



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

HARRI HANNULA

PALVELUIDEN TUOTTAMINEN MOBIILI-WIMAX-VERKOSSA

Diplomityö

Tarkastajat: professori Jarmo Harju,
Sami Peltonen (Telekarelia Oy)
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 6.2.2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Signaalinkäsittelyn ja tietoliikenteen koulutusohjelma

HARRI HANNULA: Palveluiden tuottaminen mobiili-WiMAX-verkossa

Diplomityö, 46 sivua

Huhtikuu 2013

Pääaine: Tietoliikenneverkot ja -protokollat

Tarkastajat: professori Jarmo Harju, Sami Peltonen (Telekarelia Oy)

Avainsanat: mobiili-WiMAX, IMS, LTE

Tämä diplomityö käsittelee mobiili-WiMAXia. Työn tarkoituksena on selvittää, minkälaiseen käyttöön mobiili-WiMAX on kustannustehokas vaihtoehto sekä erityisesti se, minkälaisia palveluita sen ylitse voidaan toteuttaa asiakkaille. Mobiili-WiMAX-tekniikan avulla operaattori voi tuottaa laajakaistapalvelua kustannustehokkaasti harvaankin asutuilla alueilla, kun kalliita kiinteitä asennuksia ei tarvita, vaan yksi tukiasema voi palvella asiakkaita useamman kilometrin säteellä. Maanlaajuisen verkon rakentamiseen se ei kuitenkaan sovellu, mutta se on erinomainen vaihtoehto paikallisten verkkojen toteutukseen.

Internet-selailun ja sosiaalisen median sovellusten ohella tärkein palvelu matkapuhelimen käyttäjille on yhä perinteinen puhelu. Mobiili-WiMAX on puhtaasti IP-pohjainen datansiirtoverkko, mutta hyvien QoS-ominaisuuksien ansiosta se soveltuu puheen kuljettamiseen VoIP:n avulla. Riittävän palvelutason takaaminen liikkuvalla VoIP-käyttäjälle on sen avulla kuitenkin hankalaa. Kiinteän puhelinlinjan korvaamiseen mobiili-WiMAX sen sijaan soveltuu mainiosti.

Työssä tarkastellaan myös multimediapalveluiden tuottamiseen IP-verkossa kehitettyä IMS-järjestelmää. IMS pyrkii yksinkertaistamaan palveluiden toteutusta eräänlaisen kerrosarkkitehtuurin avulla. Sovelluspalvelimilla täytyy olla rajapinta vain IMS-järjestelmään, joka huolehtii liikenteen sovittamisesta ja muun muassa QoS-määrittämisestä kaikille siihen liitetyille verkoille. Arkkitehtuurin yksinkertaistuminen ei aina johda käytännössä sovelluskehityksen helpottumiseen, eikä IMS ainakaan tällä hetkellä tarjoa mobiili-WiMAX-operaattorille sellaista lisäarvoa, että järjestelmän hankkiminen olisi perusteltua.

Lopuksi työssä tehdään katsaus verkon tulevaisuudennäkymiin ja erilaisiin päivityspolkuihin, joita mobiili-WiMAX-operaattorilla verkkonsa kehittämiseen on. Vaihtoehtoja on kaksi, WiMAX 2 ja LTE, jotka suorituskyyvyltään eivät juuri eroa toisistaan. LTE-teknologia eri kehitysasteineen kasvanee lähitulevaisuudessa merkittävimmäksi langattomaksi verkkotekniikaksi ja näyttäisikin todennäköiseltä, että useat mobiili-WiMAX-operaattorit tulevat siirtymään LTE-tekniikkaan, kun verkon päivitys tulee ajankohtaiseksi.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Signal Processing and Communications Engineering

HARRI HANNULA: Providing services in mobile WiMAX network

Master of Science Thesis, 46 pages

April 2013

Major: Communication networks and protocols

Examiners: professor Jarmo Harju, Sami Peltonen (Telekarelia Oy)

Keywords: mobile-WiMAX, IMS, LTE

This thesis discusses mobile WiMAX technology. The purpose of it is to clarify the application areas, where mobile WiMAX performs best and especially which kind of additional services can be provided to the customers via the network. Mobile WiMAX allows the network operator to provide broadband service in a cost effective way, even in the less densely populated areas, because it eliminates the need for expensive copper lines and one base station can serve multiple customers inside a circle with a radius of several kilometers. It is not a suitable solution for building a nationwide coverage, however, but it is an excellent option for local networks.

In addition to Internet browsing and social media applications, a very important service for mobile phone users is still a regular phone call. Mobile WiMAX network is purely an IP based data network, but given its extensive QoS features it can support voice over IP. An adequate service level cannot be guaranteed for mobile VoIP users due to several factors. However, mobile WiMAX network is an excellent alternative for replacing fixed phone lines.

This thesis also examines IMS, which is a framework developed for delivering multimedia services over any IP network. IMS aims to simplify the integration of multimedia services with its layer architecture, which separates application servers from underlying networks so that the servers only need to interface with the IMS system. IMS then takes care of adaptation of traffic, QoS and such for all the connected networks. This architectural simplification does not necessarily map to simpler application development, and therefore, at the moment, IMS does not provide such added value to the mobile WiMAX operator that would justify purchasing of the system.

Finally, the thesis has an overview of the future perspective of the mobile WiMAX network and the different upgrade paths to next generation networks. There are two almost equally performing options, WiMAX 2 and LTE. It is highly likely that LTE will grow to be the most important mobile network technology in the future and it seems probable that many mobile WiMAX operators will migrate to LTE technology.

ALKUSANAT

Langattoman tietoliikenteen merkitys on kasvamassa koko ajan suuremmaksi, kun käyttötavat muuttuvat liikkuvammiksi ja uusi verkkotekniikka mahdollistaa suurta-kin tiedonsiirtokapasiteettia vaativien palveluiden käytön mobiilisti. Tämän diplomityön aihe kumpuaa 11 Finnet-yhtiön omistaman Datame Oy:n mobiili-WiMAX-verkon rakennusprojektista, jossa olen saanut olla mukana alusta saakka.

Kiitän työn tarkastajina ja ohjaajina toimineita professori Jarmo Harjua ja Sami Peltosta kaikista vinkeistä ja tuesta diplomityöprosessin aikana. Teidän ansiostanne tämä työ on huomattavasti virheettömämpi. Kiitos kuuluu myös PPO-Yhtiöt Oy:n Eino Takalolle, Jari Roiniselle, Jani Manniselle, sekä koko radioverkkotiimille ja muille WiMAX-projektissa mukana olleille. Kiitos myös Datame Oy:n tekniselle henkilökunnalle.

Diplomityön on tarkoitus olla näyte opiskeluaikana opituista tiedoista ja taidoista, sekä kyvystä soveltaa niitä käytäntöön. Opiskeluaika on ollut ennen muuta kehittävää, mutta hetkittäin myös raskasta ja stressaavaa. Parasta vastapainoa minulle on tarjonnut musiikin harrastaminen. Haluankin vielä erityisesti kiittää kaikkia opiskelija- big band Torvikoplassa kanssani soittaneita lukuisista treeneistä, keikoista ja muusta oheistoiminnasta.

Tampereella 15.3.2013

Harri Hannula

SISÄLLYS

1. Johdanto	1
2. Tausta ja lähtökohdat	3
2.1 Mobiili-WiMAX	3
2.1.1 Standardit	3
2.1.2 Verkon rakenne	5
2.1.3 Kanavointi, modulaatio ja koodaus	7
2.1.4 Moniantennitekniikka (MIMO)	11
2.1.5 Päätelaitteen liikkuvuus	13
2.2 Kilpailevia tekniikoita	14
3. Käyttäjäkokemuksen varmistaminen	16
3.1 Peittoalue ja sen suunnittelu	16
3.2 Suorituskyky	18
3.3 Palvelun laatu (QoS)	19
3.4 Turvallisuus	21
3.4.1 Käyttäjätunnistus	21
3.4.2 Liikenteen salaaminen	23
4. Sisältö ja palvelut	25
4.1 Päätelaitteet	25
4.2 Yritysverkot	27
4.3 IMS	28
4.3.1 Yleiskatsaus IMS-järjestelmään	28
4.3.2 IMS WiMAX-verkossa	32
5. Siirtyminen seuraavan sukupolven verkkoon	34
5.1 LTE-verkkoarkkitehtuuri ja sen erot mobiili-WiMAXiin	34
5.2 Ratkaisuvaihtoehdot mobiili-WiMAX-verkossa	37
5.2.1 WiMAX 2 -päivityspolku	38
5.2.2 LTE Advanced -päivityspolku	38
6. Yhteenveto	41
Lähteet	43

TERMIT JA LYHENTEET MÄÄRITELMINEEN

3GPP	3rd Generation Partnership Project.
AAA	Käyttäjätunnistuspalvelin. Lyhenne sanoista autentikointi, valtuutus ja laskutus (engl. authentication, authorization and accounting).
ASN	Pääsyverkko, engl. access service network.
ASN-GW	WiMAXin pääsyverkon yhdyskäytävä, engl. access service network gateway.
CSN	Liityntäverkko, engl. connectivity service network.
ETSI	European Telecommunications Standards Institute. Eurooppalainen tietoliikennealan standardointijärjestö.
HSPA	High-speed packet access. Yhteisnimitys HSDPA (engl. high-speed downlink packet access) ja HSUPA (engl. high-speed uplink packet access) -protokollille jotka parantavat UMTS-verkon datanläpäisykykyä.
Handover	Päätelaitetta palvelevan tukiaseman vaihtaminen.
HiperMAN	High performance radio metropolitan area network. Eurooppalainen langaton laajakaistatekniikka.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers. Kansainvälinen järjestö, joka pyrkii edistämään sähkö- ja tietotekniikan kehitystä.
IMS	IP multimedia subsystem. Infrastruktuuri, jonka avulla voidaan tarjota multimediapalveluita IP-verkossa.
IMT-Advanced	International Mobile Telecommunications-Advanced. ITU-R:n vaatimusmääritykset aidolle neljännen sukupolven matkaviestinverkoille.
ITU-R	International Telecommunication Union Radio Sector. Kansainvälisen televiestintäliiton radioviestinnän sektori.
LTE	Long Term Evolution. Eräs langattomien matkaviestinverkkojen standardi.
Mbps	Megabittiä (1 000 000 bittiä) sekunnissa.
Mobiliteetti	Päätelaitteen liikkuvuus, ts. mahdollisuus vaihtaa palvelevaa tukiasemaa ilman yhteyden katkeamista.
MS	Mobiili päätelaite, engl. mobile station.
NAP	Network access provider, verkko-operaattori.

Nomadisuus	Päätelaite voi vapaasti liikkua yhden sektorin alueella, olematta kuitenkaan sidottu vain ko. sektoriin. Se ei kuitenkaan voi tehdä handoveria tukiasemasta toiseen, vaan yhteys on muodostettava uudelleen kun siirrytään toisen sektorin alueelles.
NSP	Network service provider, palveluoperaattori.
OFDM	Orthogonal frequency division multiplexing. Eräs kanavointitapa, jossa siirrettävä data lähetetään moduloituna useille kantotalloille.
OFDMA	Orthogonal frequency division multiple access. OFDM-kanavoinnin versio monen käyttäjän ympäristöihin.
Protokollakerros	Tietoliikenneprotokollat ovat erikoistuneet tiettyyn tehtävään ja ne toimivat yhteistyössä tarjoten ja käyttäen toistensa palveluita. Protokollista muodostuu kerroksittainen hierarkia, jossa jokaisella kerroksella toimii yksi protokolla.
QoS	Quality of service. Liikenteen luokittelu ja priorisointi pakettikytkentäisessä verkossa, jolla pyritään varmistamaan erityyppisten palveluiden samanaikainen toimivuus ja palvelun laatu.
SS	Tilaajapäätelaite, engl. subscriber station.
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System. Eräs kolmannen sukupolven matkaviestinverkko.
Verkkovierailu	Saman asiakaspäätelaitteen käyttäminen toisen operaattorin verkossa (engl. roaming).
WiBro	Wireless broadband. Korean Tasavallassa kehitetty langaton laajakaistatekniikka.
WiMAX	Worldwide interoperability for microwave access. Langaton laajakaistatekniikka joka perustuu IEEE 802.16 -standardiin.

1. JOHDANTO

Nyky-yhteyskunnassa laajakaistainen Internet-yhteys lasketaan peruspalveluksi, jonka tulee olla jokaisen kansalaisen saatavilla. Suomessa asiasta säädetään laissa, jossa määritelty ns. yleispalveluvelvoite takaa että maan joka kolkassa tulee olla mahdollisuus siirtonopeudeltaan vähintään 1 Mbps Internet-liittymään. Puheliikennettä varten rakennetut kuparilinjat eivät sovellu laajakaistayhteyksille muutoksitta. Tiilaajan ja puhelinkeskuksen väliset kuparilinjat ovat haja-asutusalueella niin pitkiä, että linjan laadulle herkkää laajakaistayhteyttä ei saa kulkemaan siitä läpi. Kuparilinjojen ylläpito on harvaan asutulla alueella myös kallista ja se on osassa maata lopetettukin kannattamattomana. Tällaisilla alueilla langaton yhteys on ainoa vaihtoehto.

Langattomat verkot ovat myös muilla tavoin tarpeellisia tämän päivän yhteyskunnalle. Esimerkiksi työn tekeminen ei useinkaan enää ole paikkaan sidottua, vaan työtä tehdään enenevässä määrin etänä. Ihmisten myös hoitavat sosiaalisia suhteitaan ja ovat kanssakäymisessä toistensa kanssa paljolti erilaisten viestivälineiden kautta, joten verkkoyhteyden tulee olla saatavilla missä vain kodin ja työpaikan ulkopuolella. Kuitenkaan palveluista ei haluttaisi tinkiä, vaan saman palveluvalikoiman tulisi olla saatavilla kaikkialla.

Tämä diplomityö käsittelee mobiili-WiMAXia, joka on eräs langaton laajakaistatekniikka. Työn tarkoituksena on selvittää, minkälaiseen käyttöön mobiili-WiMAX on kustannustehokas vaihtoehto sekä erityisesti perehtyä siihen, minkälaisia palveluita sen ylitse voidaan toteuttaa asiakkaille. Työ on kirjoitettu verkko-operaattorin näkökulmasta ja kyseessä on tekninen katsaus jo markkinoilla oleviin ratkaisuihin ja järjestelmiin, joita voidaan hyödyntää palveluntuotannossa mobiili-WiMAX-verkossa.

Teleoperaattoreiden ansaintamalli ei useimmiten rakennu yhden verkon varaan, vaan niiden portfolioista löytyy erilaisia kiinteitä tai mobiiliverkkoja eri alueille ja erilaisiin asiakastarpeisiin. Operaattorit profiloituvat yhä selvemmin palvelutaloiksi ja vaikka etenkin uutta verkkotekniikkaa hyödynnetään markkinoinnissa, pääasiassa fokus on asiakkaiden kokemassa palvelussa. Palveluvalikoiman tulisi olla homogeeninen ja verkkotekniikasta mahdollisimman riippumaton. Tässä työssä syvennytään IMS-arkkitehtuuriin, joka tarjoaa yleisen palveluarkkitehtuurin kaikille IP-verkoille.

Tulevaisuuden näkökohtana otetaan esille verkkoteknologian päivitys. Kasvavien vaatimusten ja nopeasti kehittyvän tekniikan ansiosta verkkojen elinkaari on lyhenemässä ja laitevalmistajat tuovat markkinoille nopealla syklillä uusia, kehittyneemmällä ominaisuuksilla varustettuja verkkoja. Operaattorin verkkolaitteet voidaan pääosin päivittää ohjelmistopäivityksin, mutta työssä perehdytään yleisemmällä tasolla verkkotekniikan päivityksessä huomioonotettaviin asioihin. Tietysti tärkeää on myös tunnistaa, mitkä palvelut uudella verkkotekniikalla ovat toteutettavissa ja mitkä eivät.

Ensimmäisessä luvussa esitellään mobiili-WiMAXin tekniikka ja verrataan sitä muihin markkinoilla oleviin verkkoteknologioihin. Seuraavassa luvussa perehdytään mobiili-WiMAXin sellaisiin ominaisuuksiin, jotka ovat oleellisia palvelun laadun kannalta. Tämän jälkeen käsitellään verkossa tarjottavia palveluita ja niiden tuottamista. Lopuksi tarkastellaan mobiili-WiMAX-operaattorin verkon eri päivityspolkuja seuraavan sukupolven tekniikoihin.

2. TAUSTA JA LÄHTÖKOHDAT

2.1 Mobiili-WiMAX

Mobiili-WiMAX on eräs langaton laajakaistaverkkotekniikka. Se mahdollistaa kiinteään verkkoon verrannolliset tiedonsiirtonopeudet (jopa 40 Mbps) sekä päätelaitteen liikkuvuuden. Verkon kantamassa mobiili-WiMAX häviää verrattuna kolmannen sukupolven matkaviestinverkkoihin korkeamman taajuusalueensa vuoksi, mutta tarjoaa vastaavasti paremman tiedonsiirtonopeuden.

Tässä luvussa esitellään mobiili-WiMAX-tekniikka ja sen ominaisuudet siinä määrin, kuin tämän työn ymmärtämisen kannalta on tarpeellista. Lisäksi esitellään lyhyesti mobiili-WiMAXin kilpailevia tekniikoita ja tehdään vertailua näiden kesken.

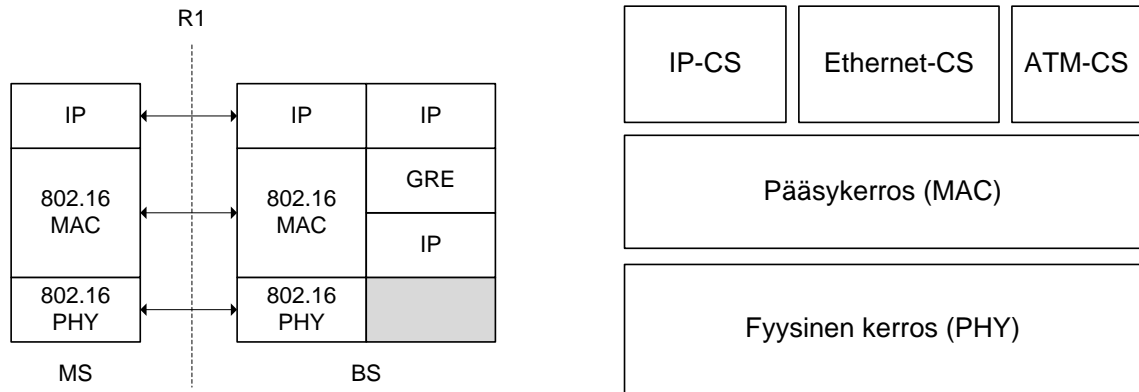
2.1.1 Standardit

WiMAX-standardia kehittää IEEE. Sen ensimmäinen versio julkaistiin vuonna 2001 ja kehitystyö on käynnissä jatkuvasti. Kirjoitushetkellä viimeisin voimassa oleva standardi on IEEE 802.16-2009. Sen perustana on IEEE 802.16-2004 (ns. kiinteä WiMAX), mutta siihen on yhdistetty 802.16-2004:n jälkeen julkaistut lisäykset ja laajennokset, tärkeimpänä IEEE 802.16e-2005, joka tarjoaa päätelaitteen liikkuvuuden ja joka tunnetaan siten mobiili-WiMAXina. Se on kirjoitushetkellä tärkein WiMAX-standardi, WiMAX-verkkoimplementaatioita on käytössä 582 [33], joista yli puolet on IEEE 802.16e-2005 mukaisia verkkoja [34]. Suomessa on käytössä muutamia paikallisia kiinteän WiMAXin verkkoja sekä Datamen valtakunnallinen (taajuuslupa) mobiili-WiMAX-verkko. Jatkossa puhuttaessa WiMAXista ja WiMAX-standardista tarkoitetaan 802.16e-2005 standardia, ellei erikseen muuta mainita.

Standardissa määritelty taajuusalue on laaja, 2–60 GHz. Kaupallisia WiMAX-sovellutuksia on olemassa viidelle taajuusalueelle, joista tällä hetkellä yleisimmät ovat 3,5 GHz ja 2,5 GHz [33]. Lisäksi vähäisemmässä määrin käytetään 2,3 GHz, 3,3 GHz ja tiettyjä 5 GHz ylittäviä taajuusalueita. Suomessa voidaan käyttää 2,5 GHz ja 3,5 GHz taajuusalueita, muut alueet on varattu toisiin käyttötarkoituksiin [3, liite 1 (Taajuusjakotaulukko)]. Kummankin alueen käyttö on luvanvaraista.

IEEE:ssä 802.16-standardi tunnetaan nimellä WirelessMAN, mutta markkinoinninimenä käytetään WiMAXia. Nimen tavaramerkin omistaa WiMAX Forum. Se on alan toimijoiden yhteenliittymä, jonka tarkoituksena on edistää WiMAX-teknologiaa

julkaisemalla teknisiä määrittelyjä standardien pohjalta ja vaikuttamalla sääntely-ympäristöön, sekä parantaa laitteiden yhteensopivuutta sertifiointiprosessin kautta. Foorumin jäseniin kuuluvat mm. kaikki merkittävät verkkotoimittajat, lukuisat laite- ja piirivalmistajat, sekä monet verkko-operaattorit. [30]



Kuva 2.1: WiMAX-standardi määrittelee yhteyden kaksi alinta protokollakerrosta. Fyysinen kerros (PHY) määrittää taajuuudet, modulaation, kanavakoodauksen jne. Pääsykerroksella (MAC) toteutetaan muiden muassa kaistanjako käyttäjien kesken, verkkoon kirjautuminen, tukiasemanvaihto ja liikenteen salaaminen. Lisäksi on määriteltä kolme sovituserrosta (engl. convergence sub-layer) Ethernet-, IP- ja ATM-liikenteelle, jotka määrittävät kuinka nämä paketit enkapsuloidaan ja siirretään ilmarajapinnan yli. Kuvassa vasemmalla on standardissa määriteltä (vaillinainen) protokollapino.

WiMAX-standardi määrittelee yhteyden kaksi alinta protokollakerrosta, fyysisen kerroksen (PHY) ja pääsykerroksen (MAC) (ks. kuva 2.1). Toisin sanoen standardi määrittää tukiaseman ja mobiiliterminaalien välisen ilmarajapinnan ja sillä välillä käytetyt yhteyskäytännöt, mutta jättää määrittelemättä kaiken muun, kuten esimerkiksi verkon muut elementit ja sen rakenteen. Verkkototeutuksien yhteensopivuutta silmälläpitäen WiMAX Forum on julkaissut WiMAX-verkon referenssiarkkitehtuurin, sekä erilaisia muita määrittelyjä tukiasemille ja päätelaitteille esimerkiksi verkkovierailuun ja päätelaitteen liikkuvuuteen liittyen. Nämä määrittelyt on julkisesti saatavilla WiMAX Forumin verkkosivuilta [29]. Näitä käsitellään tarkemmin jäljempänä.

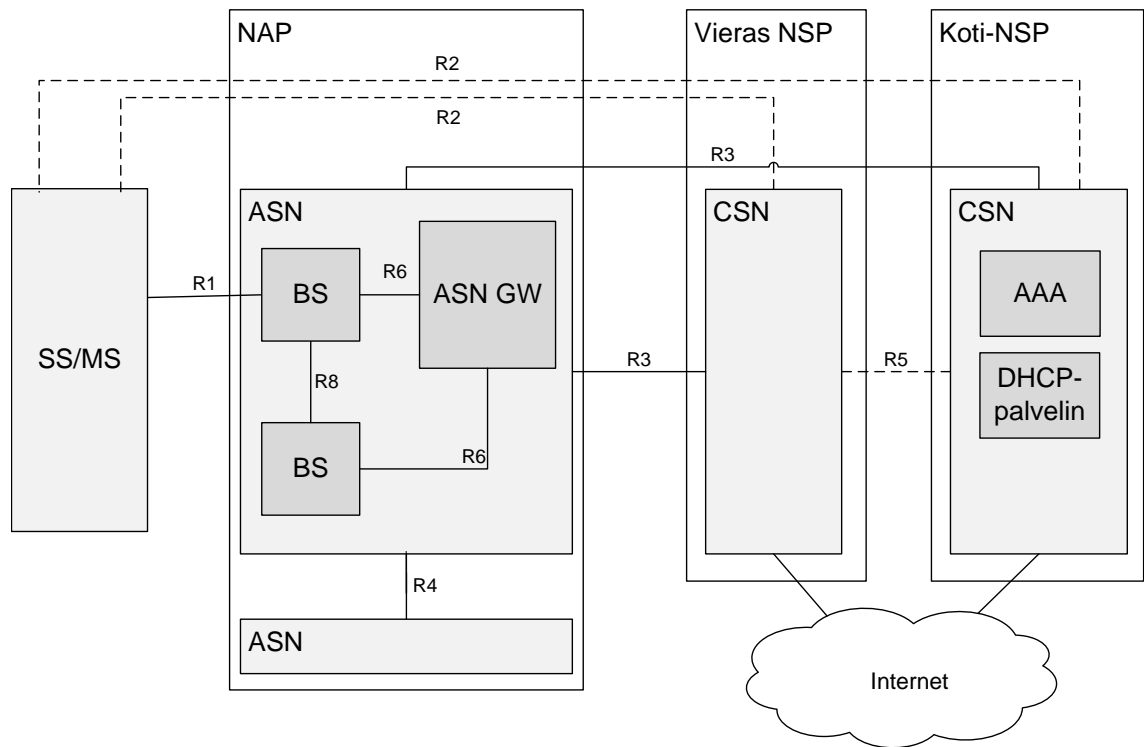
WiMAX Forum myös jakaa varmistusprosessinsa perusteella sertifiointeja WiMAX-laitteille. Sertifiointi takaa laitteen määrittelyjen mukaisuuden ja sen tarkoitus on antaa käyttäjille luottamusta eri valmistajien laitteiden yhteentoimivuudesta. Parhaatkin standardit ja määrittelyt ovat väistämättä joiltakin osin moniselitteisiä, joten sertifiointi ei kuitenkaan poista yhteensopivuustestauksen (engl. interoperability testing, IOT) tarvetta, jos verkossa on tarkoitus käyttää useiden valmistajien kehittämiä laitteita.

Seuraava suuri kehityssaskel WiMAXin evoluutiossa tulee olemaan 802.16m-standardiin (ts. WirelessMAN Advanced) pohjautuva WiMAX 2, jonka tavoitteena on

ITU:n IMT-Advanced määrittelyn [15] mukainen radorajapinta. WiMAX 2 lupaa mm. pienemmän latenssin sekä paremman VoIP-tuen ja se on taaksepäin yhteensopiva aikaisempien toteutusten kanssa [31]. WiMAX 2:ta ja verkon päivittämistä käsitellään tarkemmin tämän työn luvussa 5.

2.1.2 Verkon rakenne

IEEE 802.16-standardi ei määrittele verkon rakennetta ollenkaan. Kuten edellä on esitetty, standardi määrittää verkkoelementeistä ainoastaan tilaajapäätelaitteen ja tukiaseman, sekä näiden välisen ilmarajapinnan. Verkkolaittevalmistajien, operaattorien ja alan muiden toimijoiden yhteenliittymä WiMAX Forum on julkaissut referenssirakenteen [26], jossa määritellään muut tarpeelliset verkkoelementit, toimilohkot ja niiden väliset rajapinnat.



Kuva 2.2: WiMAX-verkon referenssirakenne. [26, s. 24]

WiMAX Forumin referenssimallissa määritellyt loogiset toimilohkot on nähtävissä kuvassa 2.2. Lisäksi kuvassa on esitetty viivoituksilla verkkoelementtien väliset ns. referenssipisteet (engl. reference point), joista yleensä puhutaan rajapintoina. Rajapinta kuvaa kahden eri toiminnallisen lohkon välisiä protokollia ja liikennettä. Kuvassa katkoviiva merkitsee hallintaliikennettä, yhtenäinen viiva hyötykuormaa ja hallintaliikennettä.

Vasemmalta alkaen kuvassa ensimmäisenä näkyy tilaajapäätelaite (engl. subscriber station, SS tai mobile station, MS). Näistä SS viittaa erityisesti kiinteästi asennettuun (esim. ulos) tai pöytämallin laitteeseen, kun taas MS-nimitystä käytetään kun halutaan korostaa päätelaitteen mobiilia luonnetta. Näitä nimityksiä käytetään kuitenkin usein toistensa synonyymeinä. Tukiasemalla (engl. base station, BS) viitataan koko siihen laitteistoon, joka tarjoaa yhteyden tilaajapäätelaitteelle, eli esimerkiksi antenneihin, kaapeleihin, radiotaaajuusyksikköön ja kantataajuusyksikköön. Tilaaajapäätelaitteen ja tukiaseman välinen rajapinta R1 viittaa ilmarajapintaan, joka on määritelty IEEE:n WiMAX-standardissa.

Tukiasema on yhteydessä pääsyverkon yhdyskäytävään eli ASN-GW:hin (engl. access service network gateway) R6-rajapinnan kautta. ASN-GW:n tehtävä on tilaajapäätelaitteen liikenteen välittäminen Internetiin sekä kaikkien tilaajapäätelaitteelta ja tukiasemilta tulevien kontrolliviestien prosessointi ja välittäminen eteenpäin. ASN-GW pitää myös kirjaa tilaajapäätelaitteiden sijainnista verkossa. Yksi ASN-GW palvelee (tyypillisimmillään; on myös olemassa verkkototeutuksia, joissa ASN-GW:n toiminnot on hajautettu tukiasemiin, eikä varsinaista fyysistä ASN-GW:tä ole verkossa lainkaan, esimerkiksi Alvarion BreezeMAX ASN-GW [4]) useita tukiasemia. Tukiaseman ja ASN-GW:n välinen liitântäyhteys voi olla fyysisesti L2- tai L3-tason yhteys, joka on toteutettu esimerkiksi valokuidulla tai radiolinkeillä. Tukiasemat voivat vaihtaa viestejä keskenään R8-rajapinnan kautta esimerkiksi handoverin yhteydessä. Tämä rajapinta on lähes poikkeuksetta virtuaalinen (mitään erillistä yhteyttä tukiasemien välille ei ole rakennettu) ja viestit kulkevat ASN-GW:n kautta. ASN-GW ja siihen kytketyt tukiasemat muodostavat yhdessä pääsyverkon (engl. access service network, ASN). Suurilla operaattoreilla voi olla useita ASN-GW:itä ja siten useampia pääsyverkkoja. Käyttäjille verkon tulee kuitenkin näyttäytyä yhtenäisenä kokonaisuutena, eli käyttäjän pitää pystyä liikkumaan saman operaattorin verkon alueella myös pääsyverkkojen välillä. Tämän vuoksi pääsyverkkojen välillä on R4-rajapinta jonka kautta välitetään muun muassa handoveriin liittyvä viestinvälitys.

Asiakasyhteydet kytketään Internetiin liityntäverkon (engl. connectivity service network, CSN) kautta. Liityntäverkossa sijaitsevat myös verkon toiminnan kannalta olennaiset AAA-, DHCP- ja mahdolliset muut palvelimet. Liityntäverkko ja pääsyverkko ovat yhteydessä toisiinsa R3-rajapinnan kautta. Tilaaajapäätteen ja liityntäverkon välillä on looginen rajapinta R2. Se määrittelee protokollat ja toimintamallit, joihin kuuluvat autentikointi, auktorisointi ja IP-osoitteen määrittely.

Referenssimallissa pääsyverkon tarjoaja (engl. network access provider, NAP) ja liityntäverkon tarjoajat (engl. network service provider, NSP) on erotettu omiksi loogisiksi kokonaisuuksikseen. Malli mahdollistaa usean palveluoperaattorin tarjota verkkoyhteyksiä yhden verkko-operaattorin ylläpitämän WiMAX-tukiasemaverkon

kautta. Liityntäverkon tarjoajien välillä näkyy verkkovierailussa (engl. roaming) tarvittava R5-rajapinta.

Lisäksi referenssimalli määrittelee vielä R7-rajapinnan ASN-GW:n loogisten toimilohkojen välille. Mallissa ASN-GW näet esitetään kahtena erillisenä entiteettinä, joista toinen käsittelee hallintaliikenteen ja toinen hyötykuorman. Tämä rajapinta ei näy kuvassa.

Merkillepantavaa on, että WiMAX Forumin referenssiarkkitehtuurissa näkyvät rakenteet ovat loogisia toimilohkoja, eivätkä ne määrittele tiukasti laitteistototeutusta. WiMAX-verkon fyysiset laitteet eivät siten välttämättä vastaa yksi yhteen referenssimallin toimilohkoja, vaan esimerkiksi ASN-GW:n toiminnallisuus voidaan hajauttaa tukiasemiin.

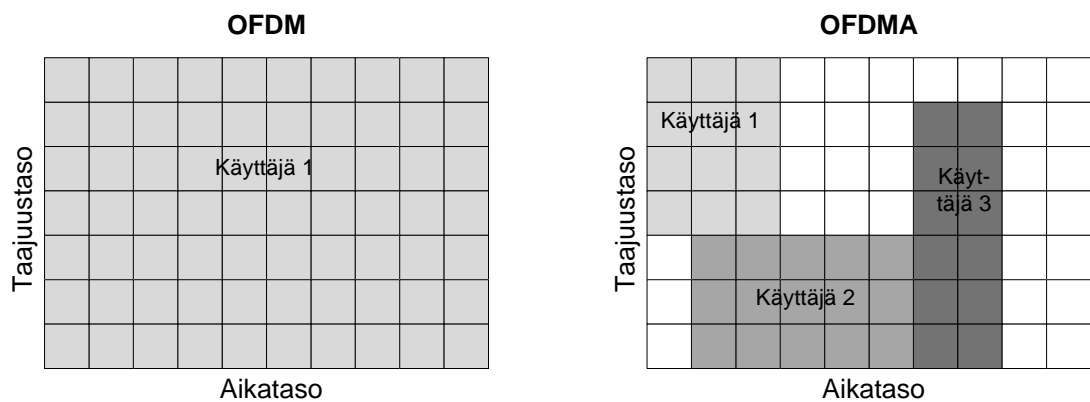
2.1.3 Kanavointi, modulaatio ja koodaus

Radioverkkojen käyttämät taajuusalueet ovat hyvin tarkkaan säänneltyjä kansallisilla ja kansainvälisillä sopimuksilla ja määräyksillä. Suomessa radiotaajuuksia hallinnoiva viranomainen on Ficora. Viranomainen antaa teleoperaattorin käyttöön tietyn taajuuskaistan, esimerkiksi Datamelle on myönnetty radiotaajuuslupa alueelle 2570–2620 MHz. Jokainen verkon tukiasema ja sektori ei käytä koko taajuuskaistaa, vaan alue jaetaan tietynlevyisiin kanaviin, joita käytetään sektoreissa tietyn radio-suunnitelman mukaisesti. WiMAX-standardi tukee useita eri kanavanleveyksiä alkaen 1,75 MHz aina 10 MHz saakka. Datamen WiMAX-verkossa käytetään 10 MHz kanavanleveyttä, mikä tarkoittaa suojakaistat huomioiden neljää kanavaa.

Yksinkertaisimmassa tapauksessa kullakin kanavalla on yksi kantoaalto, jota moduloidaan lähetettävällä signaalilla. Moderneissa langattomissa verkoissa tarvitaan kuitenkin parempaa häiriönsietoa kuin mitä tällä tavalla on mahdollista saavuttaa. Tämän vuoksi käytössä on erilaisia hajaspektritekniikoita ja monikantoaalto modulaatioita, joilla signaalin energia levitetään laajemmalle kaistalle.

Kiinteässä WiMAXissa käytetään ortogonaalista taajuusjakoista kanavointia (OFDM). Siinä perusajatuksena on yhden, laajakaistaisen ja nopeasti moduloidun kantoaallon käyttämisen sijaan jakaa kanava satoihin kapeakaistaisiin alikantoaaltoihin. Lähetettävä bittivirta jaetaan jaetaan niin ikään yhtä moneen pienemmän bit-tinopeuden virtaan, jotka moduloidaan kukin omaan kantoaaltoonsa ja lähetetään radiotien yli. OFDM-alikantoaallot valitaan siten, että niiden väli on $\Delta f = 1/T_s$, jossa T_s on symbolin kesto. Näin valitut kantoaallot ovat keskenään ortogonaalisia, mikä merkitsee sitä, että ne eivät korreloi keskenään, eli niiden välillä ei esiinny ylikuulumista eikä niiden välillä siten tarvita suojakaistoja. Tavanomaiseen taajuusjakoiseen kanavointiin verrattuna kaistat voidaan tämän vuoksi sijoittaa paljon tiheämmin. Mobiili-WiMAXissa kantoaaltojen väli on kiinteästi $\Delta f = 10937,5$ Hz [12, s. 696].

Verrattuna yhden kantoaallon modulaatioihin, OFDM-kanavoinnissa datavirtojen pienemmän bittinopeuden ansiosta symbolin kesto aika alikantoaallolla on pidempi, jolloin monitie-etenemisestä aiheutuvan symbolien välisen interferenssin (intersymbol interference, ISI) vaikutus vähenee. Symbolien välinen interferenssi aiheutuu siitä, että saman symbolin eri verran viivästyneet versiot summautuvat vastaanotuksessa, levittävät vastaanotetun symbolin energian laajemmalle alueelle ja vääristävät näin ollen sen aaltomuodon. OFDM:ssä symbolin aika on pitkä suhteessa viivästyksen aikaan, jolloin ISI ei vaikeuta merkittävästi signaalin tulkitsemista. Tämä on erittäin toivottava ominaisuus, kun vastaanotettu signaali sisältää eri reittejä pitkin tulleita viivästyneitä komponentteja, kuten mobiiliverkossa käytännössä aina on.



Kuva 2.3: OFDM ja OFDMA allokoinnin ero. Kuvassa vasemmalla OFDM-kehys ja oikealla periaatteellinen OFDMA-kehys. OFDM:ssä yksi käyttäjä saa käyttöönsä yhden kehyksen ajaksi kaikki käytössä olevat alikantoaallot, kun taas OFDMA:ssa käyttäjille annetaan kehyksestä yksi tai useampia ajan ja alikantoaaltojen lohkoja eli slotteja.

OFDM-kanavoinnissa yksittäiselle käyttäjälle allokoidaan käyttöön kaikki alikantoaallot yhden kehyksen ajaksi (ks. kuva 2.3). Kuten mainittua, kiinteä WiMAX toimii tällä kanavointiperiaatteella. Mobiili-WiMAXissa sen sijaan käytetään OFDMA-kanavointia (orthogonal frequency division multiple access), jossa useat käyttäjät liikennöivät yhtäaikaaisesti saman kehyksen aikanakin. Käyttäjien liikenne voidaan erotella kehyksen sisällä sekä ajan että taajuuden suhteen (ks. kuva 2.3). Aikatasossa OFDMA-kehys, jonka kesto kokonaisuudessaan on 5 ms, jaetaan 102,9 mikrosekunnin pituisiin osiin, joita kutsutaan symboleiksi. Taajuustasossa alikantoaalloista puolestaan muodostetaan ryhmiä, joita kutsutaan alikanaviksi. Alikanavan muodostavien kantoaaltojen ei välttämättä tarvitse olla peräkkäisiä. [12, s. 697–701]

Alikanavajakoon on olemassa kaksi pääperiaatetta: FUSC (full usage of sub-carriers) ja PUSC (partial usage of sub-carriers). Ensin mainitussa kaikki alikanavat ovat aina käytössä, PUSC sen sijaan mahdollistaa joustavamman jaottelun,

vaikkakin tyypillisesti koko taajuuskaista on käytössä koko ajan. Esimerkki PUSCin joustavuudesta on osittainen taajuuksien uusiokäyttö (fractional frequency reuse, FFR), joka mahdollistaa verkon toteuttaminen vain yhtä taajuutta käyttäen. Siinä vierekkäisten solujen reuna-alueilla jätetään $2/3$ taajuuksista käyttämättä, minkä ansiosta solut eivät häiritse toisiaan.

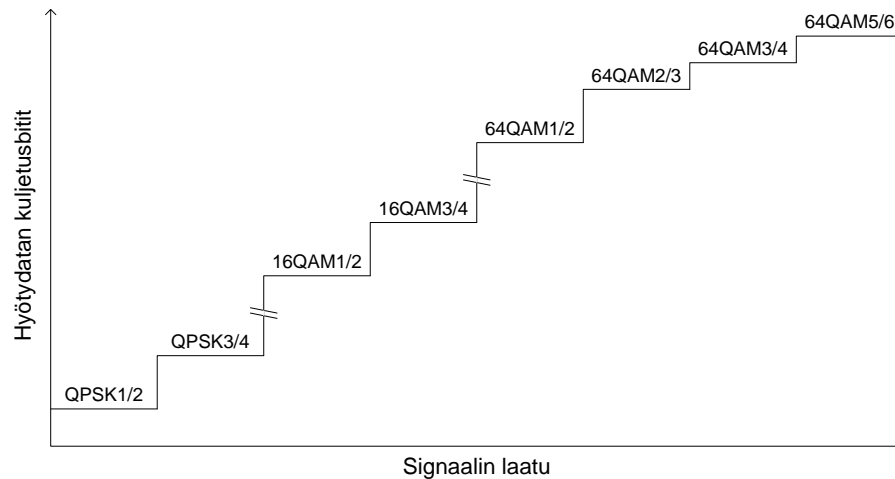
Käyttäjille allokoidaan symboleista ja alikanavista koostuvia alueita kehyksestä. Tämä alue koostuu yhdestä tai useammasta *slotista*, jonka koko on

- FUSCia käytettäessä 1 alikanava * 1 symboli ja
- PUSCia käytettäessä 1 alikanava * 2 symbolia.

Tukiasema allokoii kehyksestä kullekin aktiiviselle käyttäjälle tietyn määrän vierekkäisiä slotteja.

Mobiili-WiMAXissa on käytössä kolme modulaatiota (QPSK, 16-QAM ja 64-QAM) ja kullakin useita virheenkorjaustasoja (ks. kuvat 2.4). Järjestelmässä hyödynnetään mukautuvaa modulaatiota (engl. adaptive modulation and coding, AMC), eli modulaatiotyyppiä ja kanavakoodauksen virheenkorjaukseen (engl. forward error correction, FEC) käyttämää bittien määrää (engl. coding rate) mukautetaan signaaliolosuhteiden perusteella. Parhaissa olosuhteissa käytössä on 64-QAM $5/6$, jossa siis kuudesosa biteistä käytetään virheenkorjaukseen. Siirryttäessä kauemmas tukiasemasta tai muuten huonompaan kenttään, lisätään ensin virheenkorjausbittien määrää ja edelleen huonommissa olosuhteissa modulaatiota vaihdetaan. [18, s. 45–47]

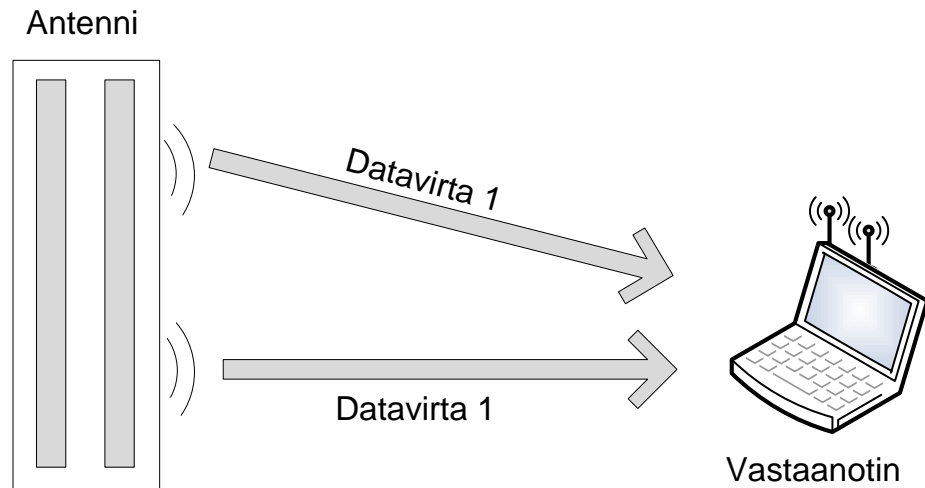
Modulaation mukauttamiseksi tukiasema tarvitsee jonkin herätteen. Kaikki tilaajapäätelaitteet raportoivat mitaamansa CINR- (engl. carrier to interference and noise ratio, signaali-kohina-häiriösuhde) ja RSSI-tasot (engl. received signal strength indication, vastaanotetun signaalin voimakkuus) tukiasemalle, joiden perusteella tukiasema saa tarkkaa tietoa signaaliolosuhteista. Lisäksi AMC:n herätteenä voidaan käyttää tilaajapäätteen uudelleenlähetyspyyntöjä. WiMAX-radiotiellä voidaan käyttää kahta vuonhallintamekanismia, ARQ (engl. automatic repeat request) ja HARQ (engl. hybrid automatic repeat request), joko jompaa kumpaa tai molempia samanaikaisesti. Kummassakin lähetettyihin paketteihin lisätään dataa, jolla lähetysvirheet voidaan havainnoida ja tarvittaessa pyytää virheelliseksi todetun paketin uudelleenlähetystä. HARQissa uudelleenlähetettyihin paketteihin lisätään lisäksi virheenkorjaustietoa (FEC, forward error correction), koska uudelleenlähetyspyyntö on merkki signaalin laadun huononemisesta. Häiriö signaalissa on todennäköisesti läsnä uudelleenlähetysten aikanakin, mutta siitä huolimatta virheenkorjaustiedon avulla vastaanottaja voi varmemmin dekodata paketin. Sitävastoin jos tilaajaterminaalilta ei tule uudelleenlähetyspyyntöjä ollenkaan, signaalin laatu on hyvä ja tukiasema voi nostaa koodaustehokkuutta ja parantaa modulaatiota.



Kuva 2.4: Mobiili-WiMAX-standardi määrittelee neljä modulaatiotyyppiä. 64QAM on optionaalinen, eikä verkon ja päätelaitteiden ole pakko tukea sitä. BPSK ei näy kuvassa, sillä sitä käytetään pelkästään signalointikanavalla. Kanavakoodaus käyttää tietyn määrän bittijä virheenkorjaustarkoituksiin ja tuo bittien määrä ilmaistaan modulaation perässä olevalla murtoluvulla. Kuvassa hyötydatan käyttämät bittimäärät ovat oikeassa suhteessa, mutta signaalitasojen rajat vaihtelevat verkkototeutuksesta ja ympäristöstä riippuen eivätkä ne todellisessa verkossa ole lineaariset.

Siirtosuuntien erotteluun WiMAX hyödyntää aikajakoista kanavointia. Standardissa on määritelty taajuusjakoinenkin profiili, mutta sitä harvemmin käytetään. Taajuusjakoisessa kanavoinnissa näet kummallekin siirtosuunnalle varataan yhtä suuri, toisistaan erillinen, taajuuskaista. Tällainen jako soveltuu hyvin symmetriselle liikenteelle, jossa kumpaankin suuntaan liikkuu saman verran dataa, kuten esimerkiksi puheluille. WiMAX soveltuu toki myös puheen siirtoon, mutta erityisesti se on suunnattu laajakaistaisen dataliikenteen siirtämiseen. Datan siirrossa alalinkin suunta on hallitseva. Aikajakokanavoinnissa käytettävissä oleva taajuuskaista voidaan hyödyntää epäsymmetrisen liikenteen tarpeisiin joustavammin kuin taajuusjakokanavoinnissa, minkä vuoksi se on laajalti käytössä WiMAX-verkoissa.

Aikajakokanavoinnissa molempien suuntien liikenne käyttää samaa taajuuskaistaa, mutta lähetys ja vastaanotto tapahtuvat eri aikaan. WiMAXin standardimäärittelyssä [25, s. 25] vaadittu kehyksen pituus on 5 ms, josta operaattori määrittelee kummallekin siirtosuunnalle allokoitavan osuuden, eli symbolisuhteen. Alalinkin symbolimäärä voi vaihdella välillä 26–35 ja ylälinkin välillä 12–21 siten, että kokonaissymbolimäärä on aina 47. Yleisesti käytössä olevia symbolisuhteita ovat 29:18, 32:15 ja 35:12. Koska kummankin siirtosuunnan liikenne kulkee samalla taajuudella, tukiasemien keskinäinen synkronisuus oltava tarkka, jotta lähetteet eivät sekoitu ja häiritse toisiaan. Synkronointiin käytetään GPS-kellosignaalia.



Kuva 2.5: WiMAX MIMO-A -tekniikassa sama data lähetetään kahdesta antennista yhtä aikaa. Tämä kasvattaa vastaanottajan mahdollisuuksia erottaa hyvälaatuinen lähete.

2.1.4 Moniantennitekniikka (MIMO)

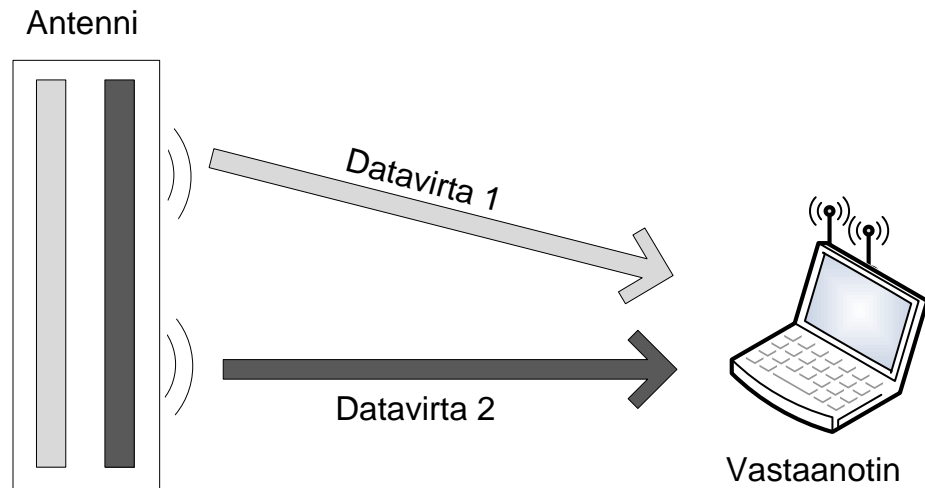
MIMO (engl. multiple input and multiple output) eli moniantennitekniikka tarkoittaa usean antennin käyttämistä lähettimessä ja vastaanottimessa. Moniantennitekniikalla saadaan parempi siirtonopeus hyvissä signaaliolosuhteissa ja toisaalta sillä saavutetaan vakaampi vastaanotto epäoptimaalisissa olosuhteissa. Se on oleellinen osa moderneja langattomia tiedonsiirtoverkkoja.

Moniantennitekniikka perustuu siihen, että radiolähete heijastuu jokaisesta maastoesteestä lähettimen ja vastaanottimen välillä. Kukin heijastunut signaali kulkee erimittaisen matkan ja saavuttaa siten vastaanottimen eri ajanhetkellä. Perinteisessä vastaanottimessa viivästyneet signaalin versiot vaikeuttavat vastaanottoa, sillä ne aiheuttavat symbolien välistä interferenssiä. Moniantennitekniikassa lähetetään useita lähetteitä samalla taajuudella ja signaalin viivästymistä käytetään hyväksi niiden erottelussa.

Moniantennijärjestelmät jaetaan kahteen luokkaan:

1. Avoimen silmukan järjestelmät, joissa lähettimellä ei ole suoraa tietoa siirtotien ominaisuuksista. WiMAXissa käytetyt *space-time coding* (MIMO-A tai MIMO Matrix A) ja spatiaalinen multipleksaus (MIMO-B tai MIMO Matrix B) ovat avoimen silmukan järjestelmiä.
2. Suljetun silmukan järjestelmät, joissa lähetin kerää tietoa siirtotien ominaisuuksista ja optimoi (suuntaa) lähetteen vastaanottajan sijainnin perusteella. Esimerkiksi WiMAXin AAS (adaptive antenna system) eli *beamforming* on suljetun silmukan järjestelmä.

MIMO-A:ssa sama datavirta lähetetään useasta eri antennista samaan aikaan.



Kuva 2.6: WiMAX MIMO-B -tekniikassa siirtonopeus kaksinkertaistetaan lähettämällä kahta datavirtaa samanaikaisesti eri antenneista. Vastaanotin pystyy erottelemaan samanaikaiset lähetteet, kunhan niillä on pieni spatiaalinen korrelaatio.

Lähetteet koodataan tietyllä lohkokoodauksella (engl. *space-time block coding*) siten, että ne ovat keskenään ortogonaalisia eivätkä interferoi keskenään. Redundanssin vuoksi vastaanottajalla on suurempi mahdollisuus vastaanottaa häiriötön ja hyvälaatuinen lähete. MIMO-A:lla saadaan parannettua kuuluvuutta erityisesti heikoissa signaaliolosuhteissa ja solun reuna-alueilla. [22]

Spatiaalisessa multipleksauksessa, jota MIMO-B:ssä hyödynnetään, lähetettävä data jaetaan useisiin virtoihin jotka lähetetään eri antenneista. Tällä keinolla järjestelmän siirtonopeutta voidaan tehokkaasti kasvattaa. Teoriassa antennien määrän tuplaaminen kaksinkertaistaa myös tiedonsiirtonopeuden. Samanaikaisten virtojen enimmäismäärä (ja siten myös nopeuden kasvu verrattuna MIMO-A-järjestelmään) riippuu antennien lukumäärästä, sillä jokaista virtaa kohden täytyy olla oma lähetin- ja vastaanotinantenni. Vastaanotin pystyy erottelemaan lähetteet, kunhan eri lähetteen kanavilla on pieni spatiaalinen korrelaatio, toisin sanoen niiden etenemien reittien ja kokemien heijastusten tulee olla riittävän erilaiset.

Päätelaitteiden lähetysteho on murto-osa tukiaseman lähetystehosta. Tämän takia mobiiliverkkojen kuuluvuusaluetta rajoittaakin ylälinkin siirtonopeus. Tyypillisessä tämän hetken WiMAX-päätelaitteessa on kaksi vastaanotinantennia ja yksi lähetinantenni, eikä tällainen päätelaite voi hyödyntää MIMOa lähettäessään dataa. Usealla lähetinantennilla varustettujen päätelaitteiden yleistyessä voidaan ylälinkisäkin käyttää MIMO-tekniikoita, jolloin kuuluvuusalue laajenee.

2.1.5 Päätelaitteen liikkuvuus

Mobiiliverkon käyttäjän tulee voida liikkua verkon alueella tukiasemasta toiseen ilman että yhteys katkeaa. IEEE 802.16-2004 -standardin mukaiset verkot eivät tue päätelaitteen liikkuvuutta, mutta mobiili-WiMAX-verkot tukevat. WiMAX Forum on määritellyt mitä mobiliteettia tukevalta verkolta ja päätelaitteilta vaaditaan (ks. [28]). Päätelaitteen liikkuvuus on määritelty aina 120 km/h asti [28, s. 10].

WiMAX-päätelaite voi olla yhteydessä tasan yhteen sektoriin kerrallaan ja eroaa tässä suhteessa 3GPP-verkoista (GSM, UMTS, LTE). Tarvittaessa se kuitenkin mittaa muidenkin kuulemiensa sektorien läheteiden voimakkuutta (RSSI), mutta tämän mittauksen aikana dataa ei voida siirtää. Mittaus aloitetaan kun palvelevan sektorin läheteen voimakkuus tippuu ennalta määritellyn rajan alapuolelle, mikä indikoi liikkumista kuuluvuusalueen ulkopuolelle ja siten sektorin vaihtotarvetta. Palveleva sektori raportoi naapurisektoriensa tunnistetut päätelaitteelle, joiden perusteella päätelaite tietää kuunnella oikeita läheteitä. Kun palvelevan sektorin läheteen voimakkuus on riittävän alhainen ja naapurisektorin lähete on riittävän paljon sitä voimakkaampi, päätelaite aloittaa handoverin sektorista toiseen. Koska päätelaite ei voi olla yhteydessä kumpaankin sektoriin yhtä aikaa, yhteys palvelemaan tukiasemaan katkaistaan ennen yhteyden luomista uuteen tukiasemaan. Tällaista handoveria kutsutaan *hard handoveriksi*. Hard handover on ainoa WiMAX-standardissa vaadittu handover-tyyppi, mutta sen lisäksi siellä kuvataan myös kaksi muuta tapaa, fast base station switching (FBSS) sekä macro-diversity handover (MDHO). Näissä kummassakin sektoreista muodostetaan ryhmiä, joiden kaikki jäsenet ovat valmiudessa kommunikoidaan päätelaitteen kanssa. Päätelaitte on kerrallaan yhteydessä vain yhteen sektoriin, mutta vaihdokset ovat nopeita.

Päätelaitteiden kulloisestakin sijainnista pidetään kirjaa ASN-GW:llä; se tietää mitkä palveluvuot kuuluvat millekin päätelaitteelle ja minkä tukiaseman kautta liikenne kulkee. Sijaintitieto on tarpeen paitsi handoverien yhteydessä, myös lepo- eli idle-tilasta aktiiviseen tilaan palattaessa. Kun päätelaite on ollut inaktiivisena tietyn ajan, eli se ei ole lähettänyt eikä vastaanottanut dataa, se menee energian säästämiseksi idle-tilaan. Tällöin kaikki päätelaitteelle allokoitut palveluvuot puretaan, mutta päätelaite säilyy kuitenkin kirjautuneena verkkoon. Idle-tilassa päätelaitteen radio on pois päältä, mutta se herää periodisesti kuuntelemaan tukiasemalta tulevia hakuviestejä (engl. paging). Ennen kuin päätelaite voi taas siirtää dataa pitää purettu palveluvuot luoda uudelleen, mutta sitä ennen verkon on paikallistettava minkä tukiaseman alueella päätelaite on. Idle-tilassa oleva päätelaitekin voi nimittäin liikkua verkon alueella vapaasti, mutta koska se ei ole aktiivisessa yhteydessä verkkoon ei handoveriakaan tapahdu eikä sen sijaintitieto siten päivity. Verkkoon lähettää hakuviestin ensin siihen sektoriin, missä päätelaite oli ennen idle-tilaan siirtymistä.

Mikäli päätelaite ei vastaa, lähetetään samanlainen hakuviesti kaikkiin sektoreihin jotka kuuluvat edellä mainitun sektorin kanssa samaan hakuryhmään (engl. paging group). Operaattori määrittelee hakuryhmiin tietyn määrän sektoreita, esimerkiksi yhden kaupungin kaikkien tukiasemien sektorit. Mikäli päätelaite ei löydy hakuryhmänkään alueelta, lähetetään hakuviesti koko verkon kaikista tukiasemista.

2.2 Kilpailevia tekniikoita

Mobiili-WiMAXin kanssa markkinoista kilpailee vakavasti yksi tekniikka, 3GPP:n kehittämä LTE (Long Term Evolution). 3GPP kehittää matkapuhelinverkkojen tekniikoita, sen käsialaa ovat niin GSM-, EDGE-, UMTS- kuin HSPA-standarditkin. Vaikka LTE onkin UMTS-tekniikan parannus ja samaa standardiperhettä, se ei kuitenkaan ole taaksepäin yhteensopiva aiempien verkkotekniikoiden kanssa. LTE:stä on sekä taajuus- (FDD-LTE) että aikajakokanavoitu (TDD-LTE) versio. Ensimmäiset LTE tuotantoverkot olivat taajuusjakoisia, muun muassa siksi että rakentajat ovat entisiä matkapuhelinoperaattoreita, joiden käytössä oleva taajuuskaista on jaettu kahteen osaan eri siirtosuuntia varten. Myös TDD-LTE tuotantoverkkoja on avattu. LTE-verkkoja käsitellään tarkemmin luvussa 5.

Suomessa 3G-verkkojen peitto alkaa olla valtakunnallisesti kattava ja joidenkin operaattorien verkossa on otettu käyttöön yli 40 Mbps nopeudet mahdollistava DC-HSPA (dual-carrier high speed packet access). Tämä tekniikka on saatavissa vain suurimmissa taajamissa ja pääosin siirtonopeus jää matalammaksi. Teknisesti 3G-verkot eivät yllä samaan suorituskyykyyn mobiili-WiMAXin kanssa, mutta verkkojen operaattorit kilpailevat samoista asiakkaista.

Datame on vuoden 2012 lopussa avannut CDMA-tekniikalla toteutetun valtakunnallisen, puhtaasti datan siirtoon tarkoitetun 3G-verkon [8]. Tekniikan etuna on että se toimii matalalla 450 MHz:n taajuusalueella, minkä vuoksi sillä saavutetaan laaja peittoalue verrattain vähäisellä tukiasemamäärällä. Lisäksi matala taajuus läpäisee maastoesteet ja rakennelmat helpommin kuin muiden 3G-verkkojen signaali. Käyttäjät voivat liikkua verkon alueella vapaasti. Tarjottava siirtonopeus on kuitenkin maksimissaankin vain 3 Mbps, eikä @450-verkko siten kilpaile mobiili-WiMAXin kanssa.

WiMAXin kaltaisia tekniikoita on kehitetty maailmalla useita. WiBro (Wireless Broadband) on yksinomaan Korean Tasavallassa käytössä oleva langaton verkko-tekniikka. Kehitystyö on tapahtunut TTA PG302 -työryhmässä (Telecommunications Technology Association, 2.3GHz Portable Internet Project Group). Työryhmän tavoitteena oli alusta lähtien mobiliteetin mahdollistava verkko, jossa siirtonopeus olisi vähintään 512/128 kbps. Kehitystyötä on sittemmin tehty yhteistyössä IEEE 802.16 -työryhmän kanssa. Käytännössä WiBro onkin samaa tekniikkaa kuin mobiili-WiMAX. [10, 21]

HiperMAN (High Performance Radio Metropolitan Area Network) on eurooppalaisen ETSI-järjestön (European Telecommunications Standards Institute) langaton laajakaistastandardi alle 11 GHz taajuuksille. Sitä kehitetään läheisessä yhteistyössä IEEE 802.16-työryhmän kanssa, ja HiperMAN onkin yhteensopiva IEEE 802.16a-2003 -standardin kanssa. Se ei kuitenkaan tue mobiliteettia, vaan ainoastaan kiinteää ja nomadista käyttöä, mikä vähentää sen kilpailumahdollisuuksia. Tietävästi yhtään tuotantokäytössä olevaan HiperMAN-verkkoa ei ole olemassa.

3. KÄYTTÄJÄKOKEMUKSEN VARMISTAMINEN

3.1 Peittoalue ja sen suunnittelu

Verkon peittoalue on nopeuden ohella tärkeimpiä ja näkyvimpiä WiMAX-verkon ominaisuuksia asiakkaan kannalta. Samalla se on suunnittelun kannalta ehkä vaikein osa-alue, sillä radioaaltojen etenemiseen vaikuttavat niin monet seikat. Yksinkertaisimmillaan etenemistä mallinnetaan kahden pistemäisen antennin välillä. Fysiikan lakien mukaan sähkömagneettisen säteilyn tehotiheys S pienenee etäisyyden neliössä, siis

$$S = \frac{P_t}{4\pi r^2}, \quad (3.1)$$

missä P_t merkitsee antennin ekvivalenttista isotrooppista säteilytehoa ja r vastaanottimen etäisyyttä antennista. Oletetaan, että vastaanottimessa on isotrooppinen (ts. pistemäinen) antenni. Tällaisen antennin vastaanottama teho P_r on

$$P_r = \frac{S\lambda^2}{4\pi}, \quad (3.2)$$

missä λ on vastaanotetun säteilyn aallonpituus. Solun kokoa rajoittaa signaalin vaimeneminen, joka ilmaistaan lähetetyn ja vastaanotetun tehon suhteena (ks. kaava 3.3).

$$\text{FSPL} = \frac{P_t}{P_r} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{4\pi r f}{c} \right)^2 \quad (3.3)$$

Tämä suhde tunnetaan vapaan tilan vaimennuksena (engl. free space path loss, FSPL). Sen mukaisesti vastaanotettu teho on sitä pienempi, mitä kauempana lähettimestä ollaan ja mitä suurempi lähetystaajuus on. Todellisuudessa radiosignaali ei etene näin suoraviivaisesti, vaan sen tiellä on erilaisia esteitä joista aallot heijastuvat ja siroutuvat. Vapaan tilan vaimennus on pohjana nämäkin ilmiöt huomioon ottavissa monkimutkaisemmissa ja tarkemmissa etenemismalleissa.

Vapaan tilan vaimennuksen avulla voidaan analysoida mobiili-WiMAXin radiotien ominaisuuksia verrattuna kilpaileviin tekniikoihin. Sen käyttämä 2,5 GHz taajuus on suhteellisen korkea, esimerkiksi suomen 3G-verkot on rakennettu 900 MHz ja 2100 MHz tekniikalla [3]. Koska suurempitaajuinen radiosignaali vaimenee nopeammin, mobiili-WiMAX-verkko tarvitsee enemmän tukiasemia kattaakseen saman alu-

een kuin esimerkiksi UMTS900-verkko. Vaimenemisen lisäksi väliaineen läpäisykyky on kääntäen verrannollinen taajuuteen; radiosignaali vaimenee läpäistessään eristävää materiaalia koska se aiheuttaa pyörimisliikettä materiaalin poolisiin molekyyleihin, kuten veteen. Suurempi taajuus aiheuttaa nopeamman liikkeen, jolloin molekyylien välinen kitkahäviö (lämpeneminen) ja siten radiosignaalin vaimeneminen on suurempaa. Tämä merkitsee sitä, että maastoesteet, kuten talot ja muut rakennelmat, ovat ongelmallisempia korkeataajuiselle signaalille. Tämän vuoksi sisätilapeitto on huonompi WiMAX-verkossa. Lisäksi sen aallonpituus on niin lyhyt, että sateen, sumun ja puiden lehtien aiheuttama siroutuminen aiheuttaa merkittävää vaimenemista signaalissa. Näin ollen käytännöllinen maksimikoko solulle on maaseudulla 3–4 km ja tiheässä kaupunkiympäristössä vain joitakin satoja metrejä.

Edellä esitetyistä rajoitteista seuraa, että mobiili-WiMAX-verkkoa ei ole taloudellisesti kannattavaa tehdä koko maan kattavaksi. Sen sijaan operaattorin on tehtävä esikartoitus alueista, joilla se uskoo olevan ansaintapotentiaalia. Operaattorin strategiasta riippuu, millaisia alueita tähän lasketaan, esimerkiksi rakennetaanko vain merkittävät asutuskeskittymät joissa investoinnin takaisinmaksuaika on lyhyt vai onko pyrkimyksenä tarjota laajakaistapalvelua myös harvempaan asutuilla seuduilla. Myös poliittisilla päätöksillä on tässä oma roolinsa, esimerkkinä mainittakoon Suomen kansallinen laajakaistastrategia (ks. [17]), jossa esitetään valtakunnallisia suuntaviivoja laajakaistayhteyden nopeudelle ja saatavuudelle.

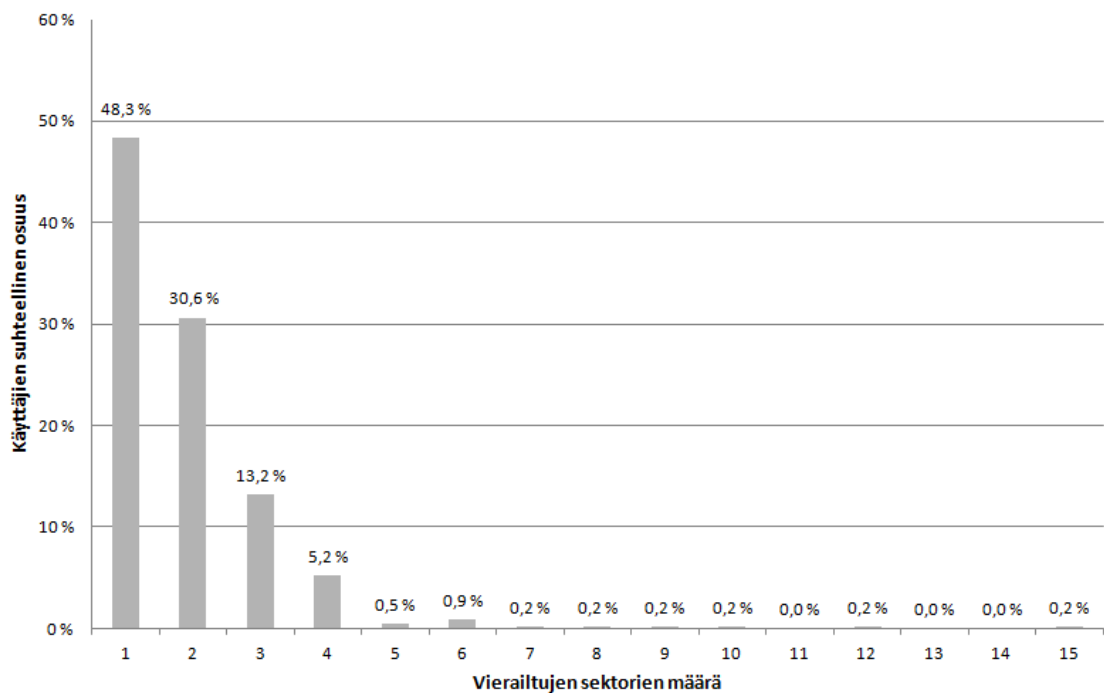
Radioverkon peittoalueen suunnittelu on kompromissi kustannusten ja käytettävyyden välillä. Tiheä tukiasemaverkko takaa suuren kapasiteetin, mutta vaatii kohtuullisen suuren käyttäjämäärän investoinnin kattamiseksi. Harvempaan asutuilla alueilla tukiaseman on katettava laajempi alue saman käyttäjämäärän saamiseksi. Korkealle mastoon sijoitetut antennit säteilevät laajalle alueelle, jolloin solun kattama käyttäjämäärä on suuri, mutta siirtonopeus käyttäjää kohti on pienempi. Sijoittamalla antennit alemmas solun kapasiteetti jakaantuu harvempien käyttäjien kesken, jolloin keskimääräinen siirtonopeuskin on suurempi. Tällöin tukiasemia tarvitaan enemmän saman alueen kattamiseen.

Aiempien sukupolvien matkaviestinverkoissa on käytetty yleisesti edellä esitetyt tavat yhdistävää suunnitteluperiaatetta. Alue, esimerkiksi taajama, katetaan ensin yhdellä korkealle sijoitetulla solulla (ns. sateenvarjopeitto). Tämän jälkeen tärkeitä asutus- ja liikekeskittymiä palvelemaan asennetaan matalammalle sijoitettuja kapasiteettisoluja. Sateenvarjosolu palvelee hyvin liikkuvia käyttäjiä, kuten taajaman lävitse kulkevia autoja. Signaalintikuorma on myös vähäinen, kun liikkuvia käyttäjiä ei tarvitse siirtää solusta toiseen. Toisaalta enemmän paikallaan pysyttelevät käyttäjät eivät täytä koko sateenvarjosolua.

Sateenvarjopeiton suunnitteluperiaate soveltuu hyvin matkaviestinverkkoihin, joita pääasiassa käytetään puheensiirtoon. Modernien älypuhelimien ja kannettavien

tietokoneiden yleistyttyä datansiirto on muodostumassa aina vain tärkeämmäksi ominaisuudeksi matkaviestinverkoissakin. Tietokoneen kanssa käytettävät langattoman verkon sovitinimet ovat osin korvanneet kiinteitä liittymiä aggressiivisen hinnoittelunsa vuoksi. Suuret solukoot eivät sovellu verkkoon, jossa on tällainen käyttäjäpohja.

Kuvassa 3.1 on nähtävillä Datamen WiMAX-verkon käyttäjien liikkuminen yhden kuukauden ajalta. Kuvasta nähdään selvästi, että 80 % käyttäjistä on paikallaanolevia. Tilastoa tulkittaessa on otettava huomioon että toistaiseksi verkossa ei ole kännykkä- tai tablet-tyyppisiä mobiililaitteita, vaan ainoastaan tietokoneeseen liitettäviä sovitinimie. Käyttäjä voidaan tulkita paikallaanolevaksi, jos vierailtujen tukiasemien määrä on yksi tai kaksi. Verkkoon kirjautumisen yhteydessä päätelaite valitsee kulloinkin parhaan sektorin, mistä johtuen paikallaan oleva päätelaitekin voi olla yhteydessä useaan sektoriin.



Kuva 3.1: Datame Oy:n WiMAX-verkon käyttäjien liikkuvuus erään kuukauden ajalta. Valtaosa käyttäjistä ei hyödynnä verkon mahdollistamaa päätelaitteen liikkuvuutta, vaan pääasiassa verkkoa käytetään staattisesti yhdessä paikassa.

3.2 Suorituskyky

Kun käytössä on 10 MHz kanavanleveys, WiMAX-verkon yhden sektorin maksimikapasiteetti on reilut 40 Mbps. Tämä jaetaan siirtosuuntien välille symbolisuhteen määräämällä tavalla, kuten luvussa 2.1.3 on esitetty.

Loppukäyttäjän saama nopeus riippuu sektorin käyttöasteesta, käyttöpaikasta ja päätelaitteen ominaisuuksista. Hyvällä käyttöpaikalla sektorissa yksin oleva käyttäjä voi saada käyttöönsä koko sektorin kapasiteetin, mikäli päätelaite tukee näin suurta nopeutta. Tällaiseen tilanteeseen ei tuotantoverkossa juuri koskaan päästä, vaan tukiasema jakaa siirtokapasiteettia tietyn algoritmin mukaisesti käyttäjien kesken.

Pääsyverkon verkkoviive (engl. round trip time, RTT) on keskimäärin 40–70 ms. Internetiin päin liikennöitäessä viivettä tulee lisää.

3.3 Palvelun laatu (QoS)

WiMAX-standardi ei ota mitään kantaa verkossa tarjottaviin palveluihin. Sen tarjoamat viisi liikenneluokkaa mahdollistavat kuitenkin erilaisten liikennetyyppien palvelumisen verkossa yhtä aikaa, siten että ne eivät häiritse toisiaan ja palvelunlaatu ei kärsi. Liikennetyypeistä esimerkiksi tiedostolataukset vaativat paljon tiedonsiirtokaistaa, mutta pakettien välitysviiveellä ei ole merkitystä. Verkkopelit ja puhelut taas vaativat viiveetöntä pakettien välitystä, mutta niiden kaistavaatimus on usein verrattain pieni.

QoS-määrittelyyn on kaksi peruslähtökohtaa: ruuhkan estäminen ja ruuhkan hallinta. Ensimmäinen perustuu tietylle reitille neuvoteltavaan kaistanvaraukseen, joka verkon on pystyttävä toteuttamaan. Mikäli joltain yhteysväliltä varataan kaikki käytössä oleva kaista, uusia yhteyksiä ei voida muodostaa. Ruuhkan hallintaan perustuvissa menetelmissä paketit luokitellaan tiettyjen määreiden mukaan ja mikäli ruuhkaa muodostuu, pakettien välitysjärjestys määräytyy tuon luokituksen perusteella. Mobiili-WiMAXin QoS on näiden yhdistelmä; radiorajapinnassa käytetään ruuhkan estämiseen perustuvaa menetelmää, tukiaseman ja ASN-GW:n välillä käytössä on ruuhkan hallintaan pohjautuva tapa.

Tilaajaterminaalin ja tukiaseman välillä liikkuva liikenne kuuluu tiettyyn palveluvuohon (engl. service flow). Vuo on yksisuuntainen datavirta jolle on määritellyt tietyt parametrit (kuten varattava kaista, lähde- ja kohde-IP, portit jne.). Vuomäärittely tapahtuu AAA-palvelimella, jonka tietokantaan on tallennettu kaikkien käyttäjien tiedot mukaanlukien palveluluokat, jotka kullekin käyttäjälle annetaan. Verkkoon rekisteröitymisen yhteydessä AAA lähettää tiedot käyttäjälle allokoitavista voista ASN-GW:lle, joka puolestaan välittää tiedon tukiasemalle. Jokaisella aktiivisessa tilassa olevalla käyttäjällä on määriteltynä vähintään yksi vuopari.

Ilmarajapinnassa kukin vuo luokitellaan sen kuljettaman liikenteen mukaan. Standardissa määritellyt viisi luokkaa on esitetty taulukossa 3.1. Luokkien ominaisuudet ovat seuraavat:

- UGS on suunniteltu reaaliaikapalveluille, esimerkiksi E1-yhteyksille ja sellaiselle VoIP-liikenteelle, jossa paketin koko on kiinteä ja jossa ei ole hiljaisuuden

Taulukko 3.1: Mobiili-WiMAXin QoS-luokat ja sallitut parametrit. [12, s. 293–295]

luokka	minimikaista	maksimikaista	maksimilatenssi	siedetty jitter
Unsolicited grant service (UGS)	X		X	X
Real-time polling service (rtPS)	X	X	X	
Extended rtPS (ertPS)	X	X	X	X
Non-real-time polling service (nrtPS)	X	X		
Best effort (BE)	X			

tunnistusta (kuten G.711 koodaukselle). Tukiasema tekee terminaalille kiinteän kokoisen kaistanvarauksen (engl. grant) säännöllisin väliajoin ilman erityistä pyyntöä. Varaus tehdään siis riippumatta siitä, onko liikennettä vai ei. Tämä voi tuhata resursseja, mutta toisaalta se myös mahdollistaa paremmin viivekriittisten sovellusten palvelemisen, kun kaistanvarauspyyntöjä ei tarvita.

- RtPS on suunniteltu reaaliaikaliikenteelle, joka välittää vaihtuvan kokoisia datapaketteja kiintein väliajoin (esimerkiksi MPEG-video). Kaistanvarausta ei ole ennalta määriteltä vaan sen suuruus määräytyy terminaalin pyynnöstä. Pyyntöjen takia rtPS generoi enemmän overheadia kuin UGS ja latenssi on jonkin verran suurempi, mutta mukautuva kaistanleveys mahdollistaa toisaalta optimaalisemman kaistan käytön.
- ErtPS toimii kuten rtPS, mutta ilman vähimmäiskaistanvarausta eli mikäli lähetettävää ei ole, voi kaistanvaraus olla myös nolla. Sopii erityisen hyvin esimerkiksi VoIP-liikenteelle, jossa käytetään hiljaisuuden tunnistusta (kuten G.729b-koodaukselle).
- NrtPS on tarkoitettu liikenteelle, jolla ei ole reaaliaikavaatimuksia mutta jolle taataan tietty minimikaistanleveys. Tämä luokka soveltuu esimerkiksi tavalliseen Internet-selailulle, jolle halutaan taata jokin tietty minimikaista.
- BE on tarkoitettu liikenteelle, joille ei taata palvelulaatua. Muut liikenneluokat

palvelullaan ensin ja jäljellejäävä kaista jaetaan BE-käyttäjien kesken.

Merkillepantavaa on, että palveluvuot (ja siten liikenneluokat) on määritelty vain ilmarajapinnassa tukiaseman ja tilaajaterminaalin välillä. Jotta palvelunlaatu olisi taattu päästä päähän, liityntäverkossa tukiaseman ja ASN-GW:n välillä on käytettävä muita QoS-menetelmiä.

Kuten edellä (ks. kuva 2.1) on kuvattu, liikenne tukiaseman ja ASN-GW:n välillä on aina IP-pohjaista. WiMAX Forumin määritysten mukaan WiMAX-verkon on tuettava IP-verkon QoS-mekanismia, kuten DSCP:tä (Differentiated services code point) [27]. DSCP on DiffServ-arkkitehtuurin ruuhkanhallintamenetelmä, jossa jokainen IP-paketti varustetaan tietyllä luokittelun ilmaisevalla tunnisteella [6]. Linkin kapasiteetin täytyessä IP-pakettien välitys- ja pudotusjärjestys määräytyy näiden tunnisteiden perusteella. Tunnisteiden jaotteluun ei ole standardissa määritetty mitään yksikäsitteistä tapaa, vaikka joitakin suosituksia on kyllä annettu, vaan tämä on jätetty verkon operaattorin tehtäväksi. Myöskään WiMAXin ilmarajapinnan QoS-luokkien kuvaamiseen DSCP-tunnisteiksi ei ole olemassa standardia tapaa.

Toinen Ethernet-liityntäverkossa käytettävä QoS-menetelmä on IEEE 802.1p -standardin mukaiset Ethernet-prioriteettibitit (engl. priority code point, PCP). Kolmannelta osapuolelta vuokratuille siirtoyhteyksille voidaan määritellä tietyt liikenneluokat ja sopia, että palveluntarjoaja välittää luokituksen mukaan merkatut paketit nopeutetusti. Yleensä sovitaan lisäksi jokin prosentuaalinen raja (esimerkiksi 10 % siirtoyhteyden nimelliskapasiteetista), minkä verran liikenteestä saa olla prioriteettibitein merkattuja. Ethernet-prioriteettibitit soveltuvat mainiosti päästä päähän QoS:n toteuttamiseen WiMAX-verkossa, edellyttäen että tukiasema ja ASN-GW tukevat niiden käyttöä.

3.4 Turvallisuus

Langattomissa verkoissa tilaajayhteyden viimeinen maili etenee sähkömagneettisena säteilynä vapaasti ilmassa. Tämä altistaa verkon suuremmille riskeille kuin langallisissa verkoissa, joissa itse siirtomediaan kiinni pääsykin edellyttää kertaluokkaa voimakkaampia toimenpiteitä.

3.4.1 Käyttäjätunnistus

WiMAX-verkossa ei käytetä erillistä autentikointimoduulia, kuten SIM-korttia, vaan käyttäjän tunnistetaan joko laitteen tai käyttäjätunnuksen ja salasanan perusteella. Käyttäjän lisääminen mobiili-WiMAX-verkkoon ei vaadi erityistä tilaajayhteyden konfigurointia, toisin kuin esimerkiksi ADSL-verkoissa joissa tilaajayhteys kulkee tiettyä kupariparia pitkin asiakkaalta DSLAMille (digital subscriber line access

multiplexer, suom. tilaajakeskitin). Uuden käyttäjän laite tulee konfiguroida verkon AAA-autentikointipalvelimelle, joka sallii pääsyn rekisteröityneille käyttäjille ja evää ei-rekisteröidyt käyttäjät verkon ulkopuolelle. Päätelaitteet tunnistetaan niiden MAC-osoitteen perusteella. Yksinään tämä ei ole riittävän luotettava menetelmä tunnistukseen, sillä MAC-osoitetta on mahdollista muuttaa ohjelmallisesti. On olemassa riski, että väärennetyllä MAC-osoitteella varustettu laite pääsee kirjautumaan verkkoon.

Laitteen tunnistuksessa käytetään tämän vuoksi varmenteita, joiden avulla laitteen identiteetti voidaan aukottomasti todentaa. WiMAX Forum ylläpitää varmenneinfrastruktuuria ja myöntää varmenteita sekä laitevalmistajille (päätelaitteet) sekä verkko-operaattoreille (AAA-palvelimet). Varmenteet ovat 2048 bittisiä RSA-varmenteita. Päätelaitteen varmenne sisältää mm. tiedon sen MAC-osoitteesta, joten väärennetyllä MAC-osoitteella varustettu laite ei voi kirjautua verkkoon. Autentikointipalvelimen varmenteeseen on sisällytetty verkko-operaattorin tunniste eli nk. NSP-ID (network service provider identification), jonka avulla käyttäjä voi olla varma että on kirjautumassa oikean operaattorin verkkoon. Mikään ulkopuolinen taho ei siten voi pahantahtoisesti tekeytyä verkon tukiasemaksi ja tällä tavoin pyrkiä kaappaamaan käyttäjän tietoliikennettä.

Varmennepohjainen pääsynhallinta edellyttää että päätelaitteeseen on asennettu

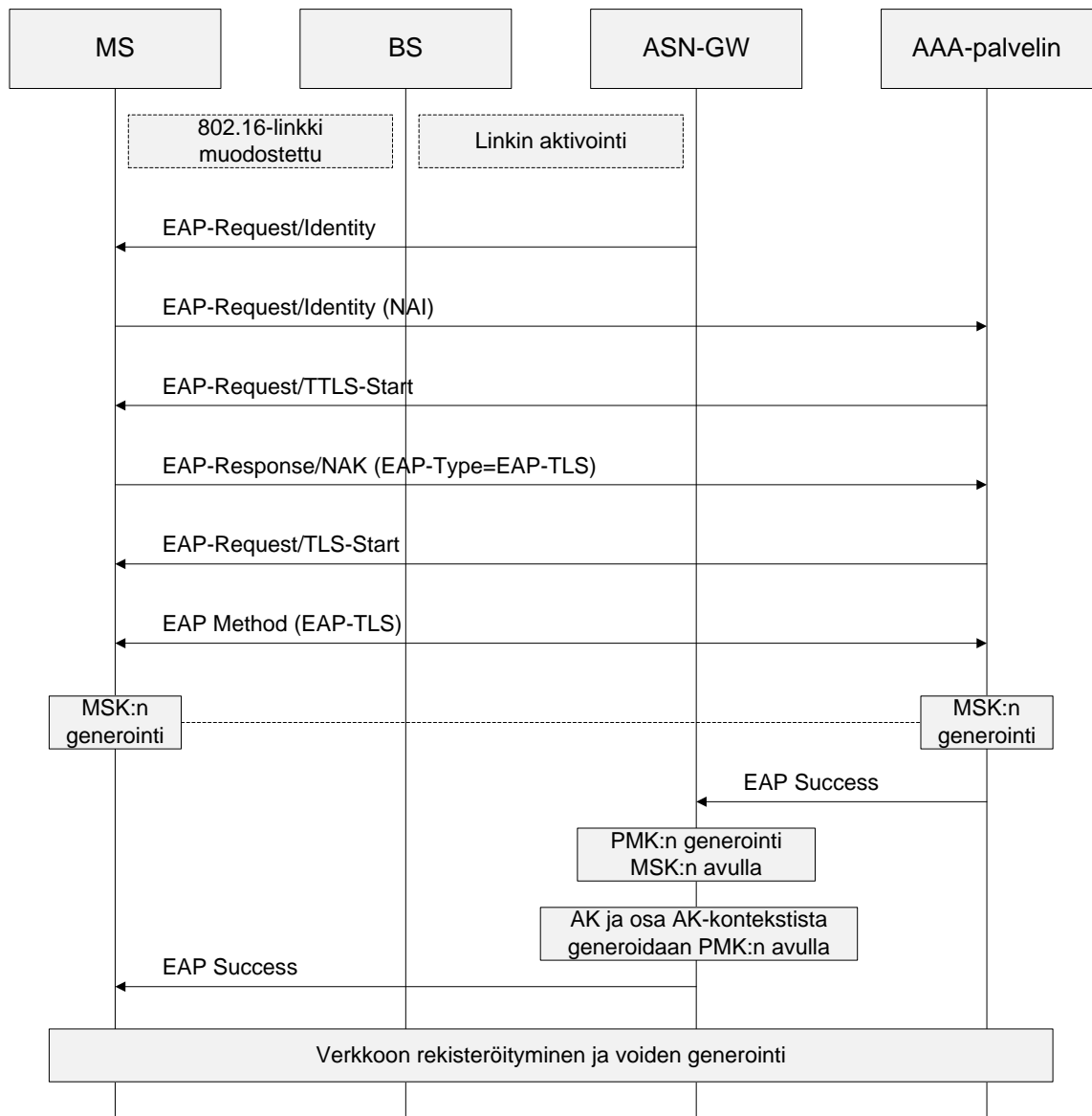
- WiMAX Forumin palvelinjuurivarmenteet (4 kpl)
- laitevarmenne
- laitevarmenteen yksityinen avain

ja autentikointipalvelimelle tulee olla asennettu

- WiMAX Forumin laitejuurivarmenteet (3 kpl)
- palvelinvarmenne
- palvelinvarmenteen yksityinen avain.

Varmentamiseen käytetään EAP-TLS-protokollaa. Varmennus etenee kuvan 3.2 mukaisesti.

Pääsynhallinta voidaan toteuttaa myös käyttäjätasolla joko yhdistettynä laitevarmennukseen tai ilman sitä. Mikäli laitevarmennusta ei käytetä, käyttäjä ei ole sidottu yhteen päätelaitteeseen vaan hän voi kirjautua millä tahansa WiMAX-päätelaitteella käyttäen henkilökohtaista käyttäjätunnustaan ja salasanaansa. Käyttäjätason autentikoinnissa protokollana on EAP-TTLS. Autentikointiprosessi etenee vastaavasti kuin EAP-TLS, tosin varmenteiden tarkistus ohitetaan mikäli laitevarmennus ei ole käytössä. Käyttäjätunnus ja salasana tarkistetaan prosessin lopuksi, jonka jälkeen verkkoon liikennöinti on mahdollista.



Kuva 3.2: Mobiili-WiMAX-terminaalin kirjautuminen verkkoon, kun käytössä on EAP-TLS. Kuvassa näkyvät autentikointiin osallistuvat toimilaitteet ja niiden välillä käytävä viestinvaihto. Mikäli käytetään EAP-TTLS-menetelmää, prosessi etenee vastaavasti kuin kuvassa, mutta prosessin lopuksi tarkistetaan vielä asiakkaan käyttäjätunnus ja salasana.

3.4.2 Liikenteen salaus

Langattomassa tietoliikenteessä siirtokanava on ainakin periaatteessa kenen tahansa vapaasti kuunneltavissa. Ulkopuolinen taho voi helposti kuunnella päätelaitteen ja tukiaseman välistä siirtokanavaa ja salakuunnella käyttäjän tietoliikennettä. Tämän vuoksi käyttäjien tietoliikenne salataan, jottei signaalia kaappaava ulkopuolinen taho pysty tulkitsemaan kaappaamansa viestinnän sisältöä.

Jokainen tukiaseman ja päätelaitteen välillä liikkuva MAC-PDU salataan erikseen, joten käytettävän algoritmin tulee olla riittävän tehokas, ettei salaus vaikuta

siirtonopeuteen alentavasti, mutta kuitenkin turvallinen. Mobiili-WiMAXissa liikenteen salaukseen käytetään joko symmetristä 56-bittistä DES-salausta tai turvallisempaa 128-bittistä AES-salausta. Symmetrisessä salauksessa sekä viestin salaamiseen että sen tulkitsemiseen käytetään samaa salausavainta. Käytetty salausavain muodostetaan tukiasemassa ja päätelaitteessa itsenäisesti käyttäen siemenlukuna verkkoon kirjautumisen (ks. kuva 3.2) yhteydessä generoitua AK:ta (authorization key). Luotu salausavain (TEK, engl. traffic encryption key) on tukiasemakohtainen, eli handoverin yhteydessä muodostetaan uusi avain. Avaimella on lisäksi määritetty elinikä, jonka jälkeen avainta vaihdetaan vaikka palveleva solu pysyy samana. AES-salausta käytettäessä liikennöinti on erittäin turvallista. [12, s. 509–515]

4. SISÄLTÖ JA PALVELUT

Kiinteät verkot ja mobiiliverkot ovat perinteisesti kehittyneet erillään toisistaan riippumatta. Kumpikin on tarjonnut tietyn valikoiman palveluita omalle asiakaskunnalleen. Tele- ja muiden tiedonsiirtoverkkojen tämän hetken yksi merkittävimmistä tulevaisuudennäkymistä on verkkojen konvergoituminen (FMC, fixed mobile convergence) eli yhteensulautuminen. ETSI määrittelee konvergenssin seuraavasti (vapaaasti suomennettuna): "Verkkojen konvergoituminen liittyy verkon ominaisuuksien ja palveluiden tarjoamiseen liityntäteknikasta riippumatta. Se ei välttämättä merkitse verkkojen fyysistä konvergenssia, vaan ensisijaisesti kysymys on yhtenäisen verkkoarkkitehtuurin ja standardien luomisesta, joita voidaan hyödyntää kiinteissä, mobiileissa ja hybridipalveluissa. Konvergoituneissa verkoissa tilaukset ja palvelut erotetaan yksittäisistä verkon liitäntäpisteistä ja käyttäjäpäätteistä, jolloin on mahdollista käyttää yhtenäistä palveluvalikoimaa minkä tahansa kiinteään tai mobiiliin päätelaitteen ja minkä tahansa yhteensopivan verkon liitäntäpisteen kautta. Tähän periaatteeseen liittyy oleellisesti verkkovierailu; käyttäjien tulisi pystyä vierailemaan muissa verkoissa ja käyttää samaa palveluvalikoimaa myös vierasverkossa. [9, s. 16]"

WiMAX-verkko on ennen kaikkea datansiirtoverkko, joka yhdistää langalliseen verkkoon verrattavat tiedonsiirtonopeudet sekä langattoman tekniikan mahdollistaman paikkariippumattomuuden. Se voi olla kustannustehokas vaihtoehto syrjäseuduilla, joilla kupari- ja valokuituyhteydet ovat liian kalliita toteuttaa. Tällaisessa tilanteessa operaattorin kannalta on siis pitkälti kyse kiinteään verkon palveluiden sulauttamisesta mobiili-WiMAX-verkkoon. Tässä luvussa tarkastellaan WiMAX-verkon sovelluskohteita, sekä minkälaisia lisäarvopalveluita siinä on mahdollista tarjota. Ensin tehdään katsaus tarjolla oleviin päätelaitteisiin ja niiden ominaisuuksiin. Sen jälkeen keskitytään IMS-arkkitehtuuriin, joka on yksi työkalu verkkojen yhteensulauttamisessa.

4.1 Päätelaitteet

Mobiiliverkkomarkkinat toimivat päätelaitevetoisesti. Uuden tekniikan käyttöönotossa tukiasema- ja päätelaitekehitys etenevät sikäli käsi kädessä, että kumpaakaan ei voi kunnolla tuoda markkinoille ilman toista. Teknologia ei kuitenkaan pääse massamarkkinoille, mikäli saatavilla ei ole kuluttajia kiinnostavaa päätelaitetta, joka tukee uutta tekniikkaa. Markkinat ovat toisin sanoen päätelaitevetoisia.

Päätelaitteet voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään:

1. kiinteästi asennettavat tai pöytämallin päätelaitteet, sekä
2. liikkuvaan käyttöön suunnitellut päätelaitteet.

Rajat ryhmien välillä voivat olla jokseenkin häilyvät. Ensimmäiseen ryhmään kuuluvien laitteiden tyypillisiä tuntomerkkejä ovat suurempi koko, virransyöttö verkkovirrasta, ulkoiset antennit, sekä RJ-45-liitäntä ja WLAN yhteyden eteenpäin jakamista varten. Ne muistuttavat ulkoisilta ominaisuuksiltaan ja käyttötavaltaan kiinteän verkon päätelaitteita (kuten ADSL- ja kaapelimodeemit). Suuremman koon ansiosta näihin laitteisiin on saatu mahdutettua kookkaammat ja paremmat antennit, jotka parantavat signaalinvoimakkuutta ja -laatua erityisesti kuuluvuusalueen reunamilla. Jos laitteessa on liitäntä ulkoiselle antennit, kuuluvuutta voidaan parantaa entisestään esimerkiksi katolle asennettavalla suunta-antennilla. Joissakin päätelaitteissa on jo valmiina suunta-antennin sisältävä ulkoyksikkö. Osassa kotipäätelaitteita on integroitu ATA-sovitin (Analogue Telephone Adapter), johon voi kytkeä tavallisen lankapuhelimen VoIP-puheluita varten. Näin WiMAX voi tehdä kupariyhteyden kokonaan tarpeettomaksi.

Toiseen päätelaiteryhmään luokitellaan USB-sovittimet ja taskukokoiset WLAN-reitittimet. Ne saavat virtansa tietokoneen USB-portista tai sisäisestä akusta, joka voidaan yleensä ladata USB-portin kautta. Laitteiden pienen koon vuoksi niiden antennit ovat melko vaatimattomia ja niiden lähetysteho on pienempi, mikä ilmenee hitaampana siirtonopeutena ja pienempänä kuuluvuusalueena. Helposti mukana pidettävänä ne kuitenkin soveltuvat hyvin liikkuvaan käyttöön.

Markkinoilla on lisäksi joitakin matkapuhelimia ja tablettitietokoneita, joissa on WiMAX-ominaisuudet sisäänrakennettuna (esimerkiksi operaattorien yksinmyynnissä olevat Yota MAX [35] ja HTC Evo 4G [11]). Niissä WiMAX-yhteyttä käytetään nopeamman datayhteyden tarjoamiseen silloin, kun puhelin on verkon kuuluvuusalueella. Operaattori voi priorisoida verkkojen käyttöä puhelimessa, ja siten esimerkiksi helpottaa ruuhkaa 3G-verkossaan niillä alueilla joissa on sekä 3G- että WiMAX-verkot. Verkonvaihto 2G/3G-verkosta WiMAXiin ei kuitenkaan ole saatamaton, vaan vaihdoksessa yhteys katkeaa ja IP-osoite vaihtuu. Sosiaalisen median sovelluksiin ja web-selailuun osoitteen tämä ei vaikuta, mutta reaaliaikasovelluksiin osoitteenvaihdos saa aikaan huomattavan katkoksen, mikä vähentää niiden mobiilia käytettävyyttä merkittävästi.

Palveluiden kannalta päätelaitteista monipuolisin on pöytäpöytälaite. Sen perään voi kytkeä minkä tahansa Ethernet-liitännällä varustetun laitteen, esimerkkinä valvontakamerat, IPTV-sovittimet ja muut medialaitteet, palomuurit ynnä muut sellaiset. Muunlaiset päätelaitteet eivät myöskään tyypillisesti tue Ethernet-CS:ää (ks. luku 4.2).



Kuva 4.1: Erilaisia WiMAX-päätelaitteita. Taka-alalla kaksi pöytäpöytälaitetta, edessä vasemmalla kaksi kannettavaa WLAN-reititintä ja etuoikealla USB-sovittimia.

4.2 Yritysverkot

WiMAX-verkossa asiakasyhteys voidaan toteuttaa suoraan L2-kerroksella käyttäen Ethernet-CS-sovituskerrasta (ks. kuva 2.1). Tämä on poikkeuksellista langattomassa verkossa ja se mahdollistaa monenlaisia sovelluksia, jotka aiemmin ovat olleet saatavilla vain langallisissa verkoissa.

Yksi tällainen sovellutus on yrityksen toimipisteiden yhdistäminen. On tilanteita, joissa toimipiste ei ole pysyvä eikä kiinteä yhteys ole siten vaihtoehto. Esimerkiksi rakennuslalla työmaakontit tai vaikkapa kirjastoautot ovat hyviä esimerkkejä tällaisesta toimipisteestä. Joissakin tapauksissa langaton verkko voi olla paras vaihtoehto myös kiinteään toimistoon.

Ethernet-CS:n avulla on mahdollista välittää 802.11Q-standardin mukaisia virtuaali-LANeja (VLAN) WiMAX-verkon ylitse. VLANien avulla samaan fyysiseen Ethernet-verkkoon voidaan luoda useita, toisistaan eristettyjä, virtuaalisia verkkoja vaikkapa sisäverkkoa ja DMZ-verkkoa varten.

Osa Ethernet-CS:n mahdollistamista palveluista on toteutettavissa erilaisten VPN-ratkaisujen avulla. VPN vaatii kuitenkin erillisen tuen laitteilta, kun taas Ethernet-CS on täysin läpinäkyvä ja mikä tahansa Ethernet-liityntäinen laite toimii sen ylitse. L2-tasolla toteutettu yhteys on myös turvallisempi kuin L3-tasolla toteutettu, sil-

lä liikenne kytketään palveluntarjoajan runkoverkossa suoraan toimipisteiden välillä eikä liikenne milloinkaan kulje julkisen Internetin kautta.

4.3 IMS

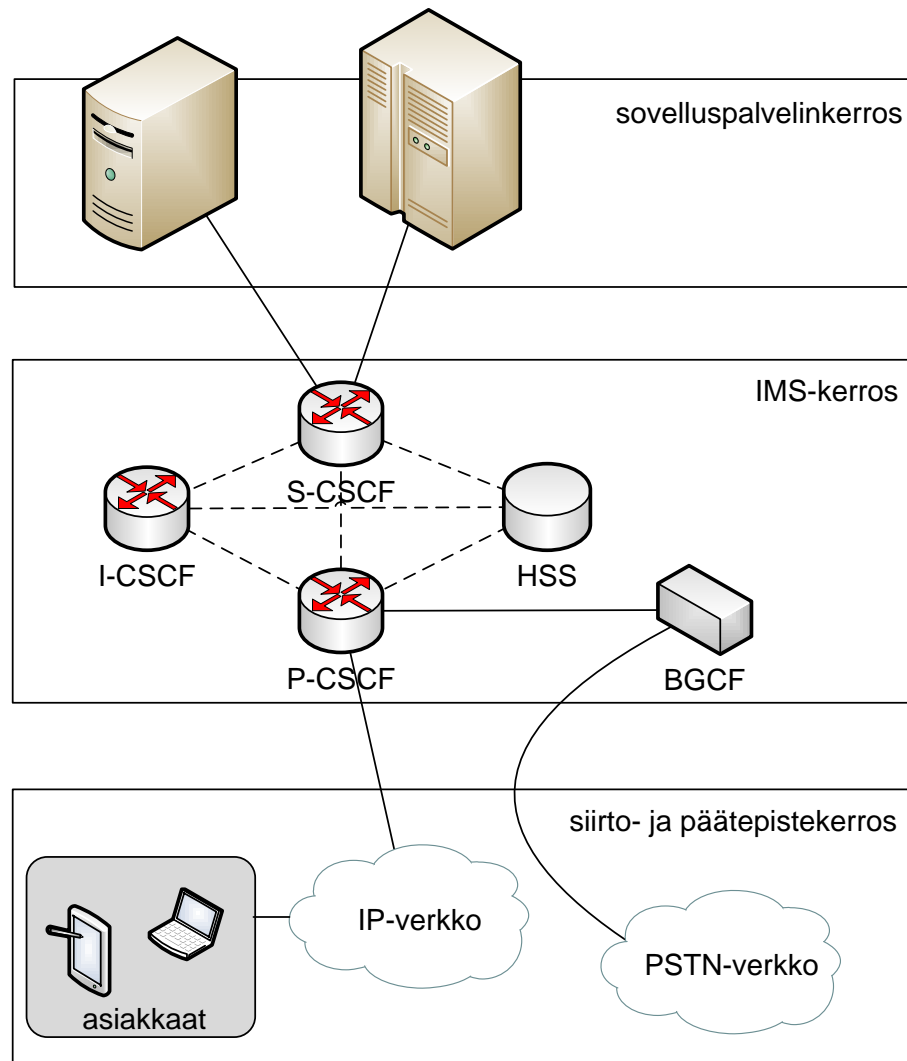
4.3.1 Yleiskatsaus IMS-järjestelmään

Kuten edellä on mainittu, teleoperaattorien kasvavana haasteena on vastaaminen asiakkaiden muuttuviin palvelutarpeisiin. Verkkoyhteyksien ja palveluiden tulisi olla saatavilla paikasta ja päätelaitteesta riippumatta, ja uusia palveluita pitäisi pystyä tuomaan markkinoille alati kiihtyvään tahtiin. Kilpailuasetelma on hyvin tiukka, sillä muiden operaattorien lisäksi samoja asiakkaita havittelevat myös sovelluskehittäjät, joille Internetin, tietokoneiden ja mobiililaitteiden yleistymisen on avannut markkinan. Esimerkkinä mainittakoon vaikkapa tekstiviestin korvaavat sovellukset, joiden avulla (pienellä kuukausi- tai vuosimaksulla) pystyy lähettämään rajattoman määrän viestejä muille saman sovelluksen käyttäjille. Operaattoreita uhkaa tässä tilanteessa pelkän bittiputken tarjoajiksi joutuminen, mikä toteutuessaan johtaa merkittäviin tulonmenetyksiin.

IMS (engl. IP multimedia subsystem) on kehitetty, jotta operaattorien olisi sitä hyödyntämällä helppo tuoda markkinoille uusia multimediapalveluita. Se on 3GPP:n kehittämä standardoitu multimediakontrolliteknologia pakettivälitteisiä verkkoja ja erilaisia liityntäteknikoita varten. IMS:n ensimmäinen versio oli osa 3GPP release 5:ttä ja se oli tarkoitettu GSM- ja GPRS-verkkoihin. Tätä seuranneessa julkaisussa tuli tuki WLAN-verkoille ja siitä seuraavassa kiinteille verkoille. IMS perustuu nimensä mukaisesti IP-protokollalle, minkä vuoksi sitä voidaan hyödyntää kaikenlaisissa pakettikytkentäisissä verkoissa. Toisin sanoen uusille verkkoinvestoinneille ei ole tarvetta, vaan palvelut tuotetaan jo olemassa olevan IP-verkon päälle. IMS:n avulla saadaan jo rakennettu verkkoinfrastruktuuri tehokkaampaan käyttöön ilman uusista investoinneista koituvia kiinteitä kustannuksia.

IMS:n tarkoituksena ei ole kuitenkaan ainoastaan helpottaa uusien palveluiden luomista, vaan järjestelmä mahdollistaa myös nykyisten palveluiden siirtämisen IP-alustalle. Perinteisten puhelinoperaattorien osalta tämä tarkoittaa puhelinliikenteen siirtämistä PSTN-verkosta VoIP-verkkoon, mobiilioperaattorien osalta taas puheen ohella esimerkiksi tekstiviestien ja videopuheluiden siirtämistä IP:n päälle.

Mikään palvelu ei kuitenkaan sinänsä vaadi IMS-järjestelmää toimiakseen, vaan ne ovat täysin toteutettavissa ilman sitä. Koska palveluiden tuottaminen IP-verkon päälle on vaivatonta ja IP-verkkoon pääsee liki millä vain päätelaitteella herää kysymys, kannattaako operaattorin investoida IMS-järjestelmään vai onko aika ajanut sen ohi? Seuraavaksi perehdytään IMS:n käytännön toteutukseen ja vaatimuksiin, joiden avulla tarkoitus on punnita sen edut ja pyrkiä vastaamaan esille



Kuva 4.2: IMS-arkkitehtuuri. [1]

nousseeseen kysymykseen.

IMS-palveluarkkitehtuuri jakaantuu kolmeen kerrokseen (ks. kuva 4.2), jotka ovat

- siirto- ja pääteapistekerros (engl. Transmission and Endpoint Layer),
- istunnon ohjauskerros (engl. Session Control Layer), joka eri yhteyksissä esiintyy toisinaan myös IMS-kerroksena (engl. IMS layer), sekä
- sovelluspalvelinkerros (engl. Application Server Layer).

Ideana on, että IMS-palvelut toteutetaan sovelluspalvelinkerroksella sijaitsevilla palvelimilla ja siirto- ja pääteapistekerroksen yhteydessä olevat käyttäjät pääsevät käsiksi näihin palveluihin IMS-kerroksen välityksellä. IMS-kerros erottaa palvelut ja pääsyverkon toisistaan ja selkeyttää järjestelmää loogisella tasolla, kun kunkin sovelluspalvelimen tulee kommunikoida vain IMS-kerroksen kanssa, joka puolestaan huolehtii viestien

sovittamisen ja kommunikoinnin kaikkien erilaisten pääsyverkkojen kanssa. IMS:n palveluita ei siten tarvitse erikseen sovittaa kaikille mahdollisille pääsyverkoille.

Kuten todettua, IMS toimii olemassa olevassa siirtoverkossa eikä se vaadi uuden infrastruktuurin rakentamista. Käyttäjä voi liittyä IMS:ään suoraan minkä tahansa IP-verkon kautta ja millä tahansa SIP-protokollaa tukevalla päätelaitteella. Lisäksi osa ei-IP-verkoista, kuten perinteinen puhelinverkko (engl. PSTN), on mahdollista liittää IMS:ään erillisen yhdyskäytävän avulla.

IMS-järjestelmän palveluihin käyttäjä pääsee käsiksi istunnon ohjauskerroksella sijaitsevan CSCF:n (engl. call state control function) kautta. CSCF:iä on kolmenlaisia:

- Proxy-CSCF (P-CSCF) on asiakkaan ensimmäinen yhdyspiste IMS-verkossa. Kaikki SIP-signaali ja liikenne asiakkaalta ja asiakkaalle kulkee P-CSCF:n kautta. Asiakas saa P-CSCF:n osoitteen joko DHCP-palvelimelta, tai se voi olla valmiiksi asetettuna päätelaitteessa. P-CSCF:n tehtäviin kuuluu muun muassa liikenteen salaus, QoS, hätäpuhelimien tunnistaminen sekä SIP-viestien otsikoiden pakkaus.
- Interrogating-CSCF (I-CSCF), jonka tehtävänä on välittää SIP-liikennettä operaattorin oman IMS-verkon sisällä. Ne myös toimivat reunalaitteina eri operaattorien IMS-verkkojen välillä.
- Serving-CSCF (S-CSCF) toimii yhdyskäytävänä sovelluspalvelimien ja IMS-verkon välillä. Se myös huolehtii kaikista SIP-sessioiden hallintaan liittyvistä toimenpiteistä, kuten käyttäjän rekisteröinnistä, reitityksestä, session tilan hallinnasta sekä laskutuksesta.

Lisäksi IMS-kerroksella sijaitsee HSS (engl. home subscriber server), joka on eräänlainen tilaajatietokanta. Sinne on tallennettu tiedot kaikista käyttäjäprofileista, ja se huolehtii käyttäjätunnistuksesta sekä pitää kirjaa käyttäjien sijainnista. PSTN-verkkoihin sovitusta varten IMS-kerroksella on BGCF (breakout gateway control function) joka muuntaa ja välittää liikenteen IMS-verkon ja puhelinverkon välillä.

Koska valtaosa IMS:n päälle rakennetuista palveluista on reaaliaikaliikennettä, QoS on erittäin oleellinen osa IMS:ää. QoS-ominaisuudet toteuttaa PDF (policy decision function) joka voi olla oma erillinen toimilaite tai se voi olla sisäänrakennettuna P-CSCF:ään. Jotta PDF voi taata palvelun laadun yhteyden päästä päähän, sen täytyy pystyä toimimaan kaikkien siihen kytkettyjen verkkojen QoS-mekanismien kanssa (mobiili-WiMAXin QoS:ää on käsitelty tarkemmin luvussa 3.2). Se esimerkiksi huolehtii kaistan varaamisesta liikenteen välittävästä verkosta ja yhteensovittaa DSCP-koodit verkkojen välillä. Erityisen haastavaa on palvelun laadun takaaminen eri operaattorien välisessä liikenteessä, sillä yleensä toisen operaattorin verkosta tulevien pakettien QoS-bittejä ja kaistanvarauspyyntöjä ei huomioida.

Tälle toimintatavalle on perusteensa, sillä toisen operaattorin huonosti käyttäytyvä laite voisi esimerkiksi varata jonkin yhteysvälin tukkoon lähettämällä riittävästi kaistanvarauksia. Yhteenliitetyissä IMS-verkoissa tilanne tulee olemaan toinen ja hyvin toimiva operaattorien välinen QoS voisi olla yksi IMS:n kilpailuvaltti muita IP-palveluita vastaan.

IMS perustuu avointen protokollien käyttöön, minkä on tarkoitus edesauttaa sen käytettävyyttä kaikenlaisissa päätelaitteissa ja verkoissa. Tärkein signaalointiprotokolla on SIP (engl. session initiation protocol), joka on määritelty IETF:n dokumenteissa RFC 2543 ja RFC 3261. SIP-protokollaa käytetään IMS:ssä multimedia-sessioiden muodostamiseen, muuttamiseen ja purkamiseen. Lisäksi protokollaa on laajennettu kattamaan muitakin IMS:n tarpeita, joihin kuuluvat muiden muassa käyttäjän- ja palvelunhallinta, QoS, kertakirjautuminen ja laskutus. Tämän vuoksi protokollasta käytetään joskus nimitystä IMS-SIP, kun halutaan tehdä ero protokollaan jossa näitä laajennoksia ei ole.

SIP on yksinkertainen, tekstipohjainen protokolla joka on kehitetty sessionhallintaan IP-verkossa. Se ei ole riippuvainen alemman kerroksen kuljetusprotokollasta vaan se toimii niin TCP-, UDP-, kuin SCTP-protokollankin päällä. SIP-protokollassa käyttäjiä ja laitteita kutsutaan agenteiksi. SIP-agentit tunnistetaan yksilöllisen URI:n (uniform resource locator) avulla. URI on muotoa sip:tunnus@domain, esimerkiksi matti.meikalainen@operaattori.invalid tai +358431234567@puhelynyhtio.invalid, ja viestinvälitys SIP-agenttien välillä tapahtuu sen avulla.

Protokollassa on kahdenlaisia viestejä, pyyntöjä (engl. request) ja vastauksia (engl. response). Jokaisella pyynnöllä on oma tyyppinsä, eli metodi, joka määrittää minkälaisesta pyynnöstä on kysymys. RFC 3621 määrittelee 6 erilaista metodologia [20], mutta muissa RFC:issä niitä on määritelty lisää. Myös vastaukset on jaettu kuuteen luokkaan sen mukaan, minkätyyppisestä vastauksesta on kyse. Luokka ilmaisee, onnistuiko pyynnön käsittely vastapäässä vai tapahtuiko siinä esimerkiksi jokin virhe.

Palveluntuottamisen kannalta SIP-protokollan käyttö tarkoittaa sitä, että IMS:n yli tarjottavan palvelun täytyy joko olla valmiiksi SIP-pohjainen tai sitä täytyy muokata siten että se tukee SIP-protokollaa. Palvelua ei kuitenkaan tarvitse kehittää alusta asti uudelleen tukemaan SIP-protokollaa, vaan se on mahdollista integroida IMS-verkkoon SIP:n itsensä tarjoamilla mekanismeilla. Palvelun datavirta voidaan ensinnäkin yksinkertaisesti enkapsuloida SIP-session sisään. Tällöin SIP huolehtii normaalisti session avauksesta IMS-verkkoon, käyttäjätunnistuksesta, laskutuksesta ja niin edelleen. Session avauksen jälkeen palvelun oma protokolla tai protokollat välittävät palvelun SIP-session sisällä, kuten ne tekevät muissakin kuin IMS-verkoissa. Välttämättä palveluntuottajan sovelluspalvelimiin ei tarvitse tehdä mitään muutoksia, vaan ne voivat toimia suoraan IMS-verkossa.

Toinen vaihtoehto on käyttää SIP-protokollaa IMS-verkkoon kirjautumiseen ja sen jälkeen ohjata käyttäjän päätelaite REFER-metodilla hakemaan palvelu, esimerkiksi suoratoistovideo, toisesta osoitteesta. Osoitteen takana olevan palvelimen ei periaatteessa tarvitse edes sijaita operaattorin IMS-verkossa, vaan se voi löytyä muualta operaattorin verkosta tai Internetistä. Verrattuna SIP-session sisään enkapsulointiin tämä vaihtoehto kuitenkin heikentää operaattorin kontrollia palveluvuosta, mikä voi muodostua ongelmalliseksi esimerkiksi laskutuksen kannalta.

Asiakaspäässä IMS-verkon palveluiden käyttöön vaaditaan SIP-asiakasohjelma, sekä jokin ohjelmisto välitettävän median käsittelyyn päätelaitteessa. SIP-asiakasohjelma löytyy lähes kaikista nykyisistä mobiilikäyttöjärjestelmistä valmiina tai sellainen on ladattavissa sovelluskaupasta. Tilanne on vastaava pöytäkoneiden puolella. Multimediasovelluksien kohdalla tilanne on toinen. SIP-protokollaa tukevia VoIP-puhelimia on saatavana sekä ohjelmistoina sovelluskaupoissa, että fyysisinä puhelinlinkineina. Nämä integroituvat IMS-verkkoon siinä missä mihin tahansa muuhun SIP-pohjaiseen VoIP-järjestelmäänkin. Muille palveluille ei löydy valmiita sovelluksia näin helposti, osaltaan sen vuoksi että SIP-protokolla ei ole yleistynyt niiden käytössä samalla tavoin kuin VoIP:ssa. Jos operaattori haluaisi tarjota vaikkapa tallettavaa Internet-TV-palvelua IMS-verkossa, sen pitäisi joka tapauksessa rakentaa sovellukset sen katseluun ainakin kaikille myymilleen päätelaitteille. IMS:n ulkopuolella sama palvelu voitaisiin tarjota vastaavan sovelluksen kautta tai kenties helpommin suoraan WWW-pohjaisena. Tässä huomataan, ettei IMS-palveluiden tuottaminen välttämättä ole käytännön tasolla juuri sen suoraviivaisempaa kuin ilman IMS:ää, vaikka järjestelmätasolla arkkitehtuuri onkin yksinkertaisempi.

4.3.2 IMS WiMAX-verkossa

Mobiilimarkkinassa WiMAX-operaattorien kilpailuasetelma 3G-operaattoreita vastaan on haastava. Datanopeudet WiMAX-verkossa ovat verrattain paremmat, mutta WiMAX-yhteydestä ei ole ensisijaiseksi yhteydeksi matkapuhelimeen puheen ja tekstiviestin puuttumisen vuoksi. WiMAX-operaattorille kenties suurin IMS-järjestelmästä saama etu olisi puheen ja tekstiviestien saaminen mobiileihin päätelaitteisiin.

Puheen välittämiseen operaattori ei kuitenkaan tarvitse IMS-järjestelmää. Sama SIP-palvelin, joka palvelisi asiakkaita IMS:n sovelluspalvelimena, voi palvella asikkaita myös suoraan. Puhelut välitetään normaalisti VoIP-tekniikalla SIP-palvelimelta IP-puhelinkeskukseen tai -vaihteeseen, josta ne reititetään puhelinverkkoon tarpeen mukaan joko pakettikytkentäisenä tai yhdyskäytävän kautta piirikytkentäisenä.

Tekstiviestien kannalta tilanne ei ole yhtä triviaali. 3GPP on standardoinut [2] tavan välittää tekstiviestit SIP-protokollaa käyttäen, mutta tämä standardi on hyvin IMS-keskeinen. Avoimeen koodiin perustuvia SMS-yhdyskäytäviä [16] ja teks-

tiviestejä tukevia SIP-palvelimia [19] on saatavissa, ja niitä hyväksi käyttäen voisi olla mahdollista kehittää ja toteuttaa SMS-yhdyskäytävä VoIP- ja GSM-verkkojen välille. Haasteena tässä ratkaisussa on operaattoriympäristön luotettavuus- ja välityskykyvaatimusten täyttäminen.

LTE-verkoissa IMS on ainoa tapa puheen välittämiseen. Nähtäväksi jää miten IMS:n suosio kasvaa, kun operaattorit alkavat suuressa mittakaavassa päivittää verkkojaan LTE-tekniikkaan. Suurempi käyttäjämäärä todennäköisesti tulee lisäämään tarjolla olevien sovellusten lukumäärää ja houkuttelevuutta lisää myös se että operaattorit voivat yhdistää IMS-verkkojaan ja hyötyä näin verkkovierailusta toistensa verkoissa; puhtaassa VoIP-ympäristössä tämä on hankalaa kustannusten ja palvelun laadun kannalta. Muutoin IMS:ssä on tällä hetkellä WiMAX-operaattorille lähinnä vain potentiaalia, jonka lunastamisesta ei ole takeita.

5. SIIRTYMINEN SEURAAVAN SUKUPOLVEN VERKKOON

Langattomien verkkojen seuraava kehitysaskel on siirtyminen IMT-Advanced-määritykset täyttäviin verkkoihin, eli niin sanottuihin aitoihin neljännen sukupolven verkkoihin. Kirjoitushetkellä on olemassa kaksi nämä määritykset täyttävää standardia, LTE Advanced eli LTE-A sekä WiMAX 2. IMT-Advanced-määrittelee tiettyjä vaatimuksia, jotka verkon pitää täyttää, jotta se voidaan virallisesti hyväksyä neljännen sukupolven verkoksi, esimerkiksi alalinkin siirtonopeuden tulee olla 100 Mbps liikkuvalla ja 1 Gbps paikallaan olevalle käyttäjälle. Muut vaatimukset liittyvät muun muassa spektritehokkuuteen, taajuuskaistoihin ja niiden tehokkaampaan käyttöön sekä yhtäaikaisten aktiivisten käyttäjien määrään solussa. Kaiken kaikkiaan päämääränä on että operaattorit pystyvät kohtuullisilla investoinneilla tarjoamaan asiakkailleen entistä parempaa palvelua.

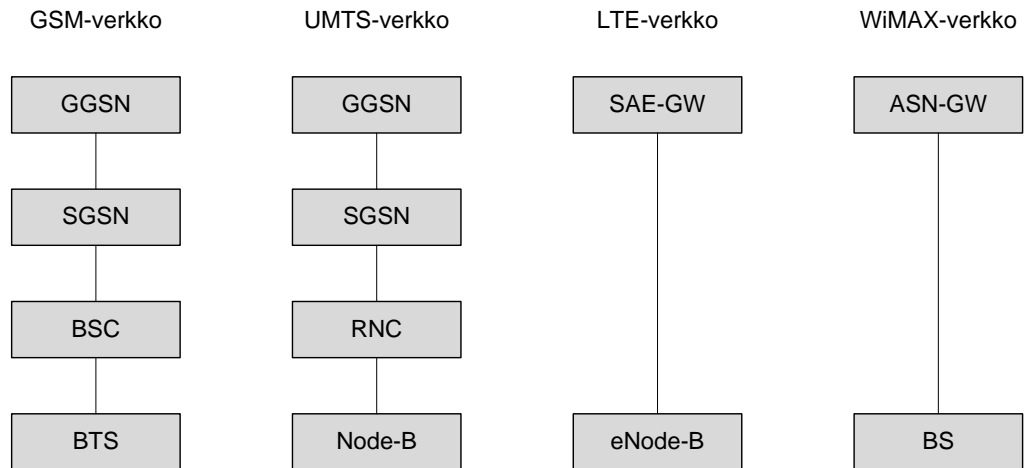
Tässä luvussa esitellään ensin LTE-tekniikka pääpiirteissään ja verrataan sitä mobiili-WiMAXiin. Tämän jälkeen tarkastellaan päivityspolkuja aitoon neljännen sukupolven verkkoon, joita mobiili-WiMAX-operaattorilla on.

5.1 LTE-verkkoarkkitehtuuri ja sen erot mobiili-WiMAXiin

LTE (engl. long term evolution) on 3GPP:n kehittämä langaton verkkotekniikka ja se pohjautuu aiempiin GSM/EDGE ja UMTS/HSPA-verkkoihin. LTE parantaa verkon kapasiteettia ja siirtonopeutta sekä pienentää latenssia. Pidemmällä tähtäimellä se pyrkii olemaan mahdollisimman yleiskäyttöinen langaton tekniikka ja nimensä mukaisesti tarjoamaan pitkän ajan kehityspolun mobiiliverkoille.

Teknisesti LTE-verkko muistuttaa hyvin paljon WiMAX-verkkoa. Molemmat käyttävät alalinkissä samaa OFDMA-kanavointia, ne käyttävät osin samoja taajuusalueita (2,3 GHz ja 2,6 GHz) ja kaistanleveyksiä, ja kumpikin on täysin IP-pohjainen verkko. Yhteistä on myös matalampi hierarkia verrattuna edeltäviin 3GPP-verkkoihin (ks. kuva 5.1). Tukiasemaohjaimen toiminnot on LTE-verkossa integroitu suoraan tukiasemaan (ks. kuva 5.2), minkä ansiosta signaalintiliikennettä on vähemmän ja verkon latenssi on saatu pienemmäksi.

Kuten WiMAX-tekniikassakin, LTE:ssä on määritelty sekä taajuusjakoinen (FDD) että aikajakoinen (TDD) kanavointi. LTE-tekniikassa taajuusjakoista kanavointia tullaan käyttämään huomattavasti enemmän kuin WiMAXissa johtuen muun muas-



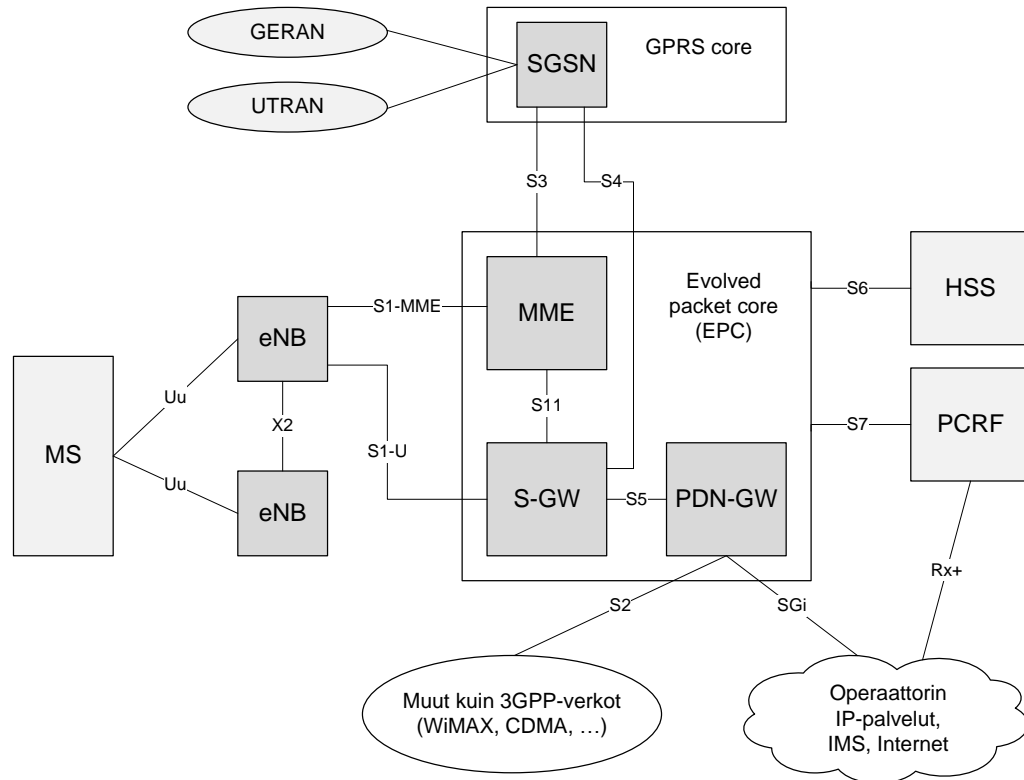
Kuva 5.1: GSM-, 3G-, LTE- ja WiMAX-verkon arkkitehtuurit. LTE- ja WiMAX-arkkitehtuurit ovat hierarkialtaan matalampia verrattuna aikaisempiin.

sa siitä, että perinteiset mobiilioperaattoreille allokoitua taajuuskaistat ovat nimenomaan FDD-kaistoja. On nähtävissä että GSM/UMTS-operaattorit tulevat ensimmäisten joukossa päivittämään ainakin osan verkkoaan LTE-tekniikkaan. Kuitenkin esimerkiksi Kiinassa LTE:n käyttöön on allokoitu aikajakoinen taajuuskaista. Kaistaa pitää hallussaan maan suurin operaattori China Mobile, jolla on yli 700 miljoonaa asiakasta. Tämä houkutellee valmistajia tuomaan myös TDD:tä tukevia päätelaitteita markkinoille.

Verrattuna mobiili-WiMAXiin, LTE tukee leveämpää kaistanleveyttä; kirjoitushetkellä uusin viimeistelty standardi rev. 8 määrittelee 20 MHz kanavanleveyden, joka on kaksinkertainen mobiili-WiMAXin maksimikaistanleveyteen nähden. Leveämpi kanava luonnollisesti mahdollistaa suuremmat tiedonsiirtonopeudet.

LTE toimii useammilla taajuuskaistoilla kuin mobiili-WiMAX, joka toimii vain 2,3, 2,5 sekä 3,5 GHz taajuuskaistoilla. LTE-verkolle mahdollisia taajuuksia ovat kaikki IMT-taajuudet [13], joskaan kaikille kaistoille ei vielä ole saatavilla kaupallista toteutusta tai päätelaitteita. Potentiaalinenkin tuki laajalle taajuuskaistojen kirjoille kuitenkin tarkoittaa sitä, että taajuusregulointi ei juurikaan rajoita LTE-verkon leviämistä. IMT-määritykset toimivat ohjenuorana kansallisille taajuuksien hallintaelimille, minkä vuoksi useimmissa maissa ainakin jokin IMT-taajuuksista on matkaviestinverkkojen käytettävissä [13].

LTE on ensimmäinen mobiiliverkkoteknologia jossa siirtosuunnille käytetään keskenään erilaista modulaatiota. Tukiasemalta käyttäjälle päin LTE käyttää OFDMA-kanavointia, kuten mobiili-WiMAXkin. Käyttäjältä tukiasemalle päin LTE käyttää SC-FDMA-kanavointia (single carrier FDMA, yhden kantoaalloon taajuusjakoinen kanavointi), jonka merkittävin etu verrattuna OFDMA:han on pieni PAPR eli ero signaalin huippu- ja keskiarvojen välillä. Tämän ansiosta LTE-päätelaitteessa pär-



Kuva 5.2: LTE-verkon laitteet ja rajapinnat.

jätään heikkotehoisemmalla vahvistimella, mikä puolestaan tarkoittaa pienempää virrankulutusta ja siten pidempää akunkestoaikaa. SC-FDMA on joissain tilanteissa suorituskyvyltään hieman heikompi kuin OFDMA [5], mutta virransäästö on kannettavan laitteen kannalta tärkeämpi ominaisuus.

Aiemmista 3GPP-tekniikoista poiketen LTE:stä on jätetty kokonaan pois tuki piirikytkentäiselle puheelle. Kaikki liikennöinti LTE-verkossa tapahtuu vain ja ainoastaan pakettikytkentäisesti IP-protokollalla. Puheen siirtoon on kolme mahdollisuutta:

1. Puhe välitään VoIP-puheluna IMS-järjestelmän (ks. luku 4) ylitse. Tämä tekniikka kulkee nimellä VoLTE (engl. voice over LTE).
2. Saapuvan tai lähtevän puhelun ajaksi päätelaite siirtyy käyttämään 3G- tai GSM-verkkoa (CS-fallback).
3. Päätelaite on jatkuvasti yhteydessä sekä 2G/3G-verkkoon puheluita varten, sekä LTE-verkkoon datansiirtoa varten. Molempien radioiden päälläolo kasvattaa virrankulutusta, minkä vuoksi päätelaitteen akun kesto heikkenee merkittävästi tätä tekniikkaa käytettäessä.

Operaattorit, jotka rakentavat LTE-verkkoa 2G/3G-verkon rinnalle tulevat varmasti hyödyntämään olemassa olevaa piirikytkentäistä verkkoa puheen siirrossa vielä

pitkään. Uudella operaattorilla tätä vaihtoehtoa ei ole. On mielenkiintoista nähdä, missä vaiheessa myös perinteiset operaattorit siirtyvät mobiiliin VoIP:iin.

Suorituskyvyllisesti LTE:n mahdollistama suurempi kaistanleveys tarjoaa paremman siirtonopeuden mutta muutoin tekniset erot verkkojen välillä ovat pieniä. LTE-tekniikalla on muita, ei teknisiin ominaisuuksiin liittyviä etuja, kuten laajempi päätelaitetarjonta, sekä suuremman ja kilpaillumman markkinan ansiosta pienemmät laitekustannukset. Lisäksi, koska LTE-operaattoreita on maailmalla enemmän, operaattori voi tarjota asiakkailleen huomattavasti suuremman peittoalueen verkkovierailun kautta kuin WiMAX-tekniikalla on mahdollista. Ratkaisevia teknisiä eroja verkkojen välillä ei ole, joten ratkaisu on tehtävä muilla perusteilla.

5.2 Ratkaisuvaihtoehdot mobiili-WiMAX-verkossa

Kun suuntana on päivitys aitoon neljännen sukupolven tekniikkaan eli IMT-Advanced-määritykset täyttävään tekniikkaan, mobiili-WiMAX-operaattoreilla on kaksi mahdollista päivityspolkua verkoilleen. Mobiili-WiMAX-verkko voidaan päivittää joko suoraan IEEE802.16m-standardin mukaisiksi WiMAX 2 -verkoiksi tai 3GPP-standardin mukaisiksi TDD-LTE-verkoiksi ja siitä edelleen LTE-A-verkoiksi.

Kuten edellä todettiin, suorituskyvyltään nämä kaksi tekniikkaa ovat hyvin samankaltaisia. Samankaltaisuus mahdollistaa WiMAX-tukiaseman päivittämisen LTE-verkoksi parhaimmillaan pelkän ohjelmistopäivityksen avulla. Laitevalmistajasta ja toteutuksesta riippuu, vaatiiko LTE-päivitys myös tukiaseman radio-osien ja ohjainkorttien vaihtoa.

Myöskään WiMAX 2 ja LTE Advanced -verkkojen välillä ei ole mainittavaa suorituskyvyllistä eroa, sillä kummatkin täyttävät aidolle neljännen sukupolven verkolle asetetut vaatimukset.

Tekniset seikat ovat kuitenkin vain yksi osa tätä yhtälöä, eikä yhtä oikeaa ratkaisua ole olemassa. Päivityspolun valintaan vaikuttavat lisäksi ainakin

- strategiset valinnat, kuten se minkälaisia palveluita verkossa tarjotaan ja miten ne skaalautuvat uuteen verkkoon. On myös punnittava minkälainen kilpailutilanne markkinalla on sekä arvioitava minkälaisia ratkaisuja muut operaattorit tekevät.
- viranomaismääräykset ja regulaatio. Operaattorin hallussa olevat taajuuskaislat eivät välttämättä sovellu molemmille tekniikoille.
- asiakasprofiilit ja käyttökohteet, kuten kuinka paljon käyttäjät ovat valmiita maksamaan teknologisesti edistyneemmästä verkosta ja sen palveluista.

Seuraavissa kahdessa aliluvussa tarkastellaan näitä vaihtoehtoisia kehityspolkuja ja päivitysprosesseja yksityiskohtaisemmin.

5.2.1 WiMAX 2 -päivityspolku

WiMAX 2 -verkko on täysin taaksepäin yhteensopiva aiemman standardin mukaisien päätelaitteiden kanssa [24]. Asiakkaiden kannalta verkkotekniikan vaihto on tämän vuoksi näkymätöntä, sillä se ei vaadi mitään toimenpiteitä ja asiakkaalla jo oleva päätelaite toimii täysin kuten ennenkin. Asiakkaat, jotka haluavat nauttia uuden verkon tarjoamasta nopeammasta yhteydestä, joutuvat toki vaihtamaan uuden standardin mukaiseen päätelaitteeseen. Tekniikanvaihdossa selvittää kuitenkin verrattain vähäisellä koordinoinnilla, kun päätelaitteiden vaihtoa ei tarvitse tehdä ennen tukiaseman päivitystä.

WiMAX Forum esittää operaattoreille kaksivaiheista päivityspolkua, jossa ensin päivitetään vähitellen osa tukiasemista alueittain sen mukaan, missä lisäkapasiteetille on tarvetta. Päivitys voi edetä joustavasti kun kaikkia tukiasemia ei tarvitse päivittää kerralla, eikä välttämättä ollenkaan. Tukiasemat ja päätelaitteet ovat täysin ristiin yhteensopivia, siten että WiMAX ja WiMAX 2 -standardien mukaisia päätelaitteita voidaan käyttää kummankin tekniikan mukaisten tukiasemien kanssa. Myös core-verkon osalta yhteensopivuus on otettu huomioon ja WiMAX 2 -tukiasemat pystyvät toimimaan aiemman verkon core-elementtien kanssa suoraan.

Toisessa vaiheessa operaattori voi päivittää ASN-GW:n ja AAA-palvelimen, jolloin saadaan käyttöön kaikki uuden standardin ominaisuudet, kuten päätelaitteen identiteetin salauksen, paremman virransäästötilan ja parannetun päätelaitteen liikkuvuuden. Kaksivaiheinen päivityspolku ja täysi taaksepäin yhteensopivuus mahdollistavat hyvin joustavan päivityksen joka on toteutettavissa verrattain pienin kiintein kustannuksin.

Jotta WiMAX 2:n nopeampaa tiedonsiirtonopeutta voidaan täysimittaisesti hyödyntää, operaattorin pitää kasvattaa tukiasemien siirtoyhteyksien kapasiteettia. Kun mobiili-WiMAX-verkossa solun maksimikapasiteetti on ollut noin 40 Mbps, se voi WiMAX 2 -verkossa olla yli viisinkertainen [32, s. 4]. Kolmesektoriselle tukiasemalle tarvitaan näin ollen ainakin 500 Mbps siirtoyhteys, jotta se ei muodostu pullonkaulaksi rajoittamaan yhtäaikaisten käyttäjien siirtonopeutta.

WiMAX 2 -verkossa voidaan tarjoaa kaikki samat palvelut, mitä mobiili-WiMAX-verkossakin. Kasvanut tiedonsiirtokapasiteetti mahdollistaa uusien, enemmän tiedonsiirtokaistaa vaativien multimedia- ja muiden palveluiden tarjoamisen. Vastavasti sitä koskevat samat rajoitteet, mitä mobiili-WiMAX-verkollakin on, esimerkiksi uusimmat matkapuhelimet tuskin tulevat oletuksena tukemaan WiMAX 2 -verkkoa.

5.2.2 LTE Advanced -päivityspolku

LTE Advanced -verkkoon siirtyminen tapahtuu välivaiheen kautta. Olemassa olevan mobiili-WiMAX-verkon tukiasemien ohjelmisto päivitetään LTE-yhteensopivaksi ja

tehdään mahdolliset muut toimenpiteet jotka tukiaseman LTE-tuen varmistaminen vaatii. LTE-verkko voidaan myöhemmin päivittää edelleen LTE Advancedia tukivaksi.

Teknologiasta toiseen siirtyminen ei käy yhtä helposti kuin WiMAX-versiosta toiseen päivittäminen. WiMAX- ja LTE-päätelaitteet eivät ensiksikään toimi ristiin toisen teknologian verkossa. Tämän takia verkon vaihtoa ei voida tehdä vastaavalla tavalla vähitellen kuten WiMAX 2 -verkkoon siirryttäessä, vaan päivitys on tehtävä koordinoitusti alue kerrallaan. Käytännössä tämä on tehtävä niin, että asiakkaille toimitetaan (tai kehoitetaan hankkimaan) uudet päätelaitteet ja ilmoitetaan päivämäärä, jolloin vanha verkko lakkaa toimimasta ja uuden verkon päätelaite tulee ottaa käyttöön. Asiakkaille aiheutuva haitta eli katkos verkkoyhteydessä saadaan minimoitua, kun tukiasemien päivitys tehdään yöaikaan. Vaihtoalueen koko on resursointikysymys. Mikäli tukiasema vaatii pelkän ohjelmistopäivityksen joka voidaan tehdä etänä, voidaan yhdellä kertaa päivittää suurikin määrä tukiasemia. Tukiasemia, joihin pitää tehdä paikan päällä jokin toimenpide, ei ehditä päivittää yhdessä yössä kovin suurta määrää. Joka tapauksessa yhtenäisen peittoalueen (tyypillisesti yksi kaupunki tai taaajama) kaikki tukiasemat kannattaa vaihtaa tekniikasta toiseen samalla kertaa. Jos peittoalue on niin suuri, ettei sen tukiasemia ehditä päivittää kerralla, joudutaan mobiili-WiMAXin ja LTE:n kehukset sovittamaan yhteen jotteivät eri teknologioiden mukaiset lähetteet interferoi keskenään. Lähtökohtaisesti kehukset ovat eri mittaiset, mutta ne pitää sovittaa siten, että kummankin uplink ja downlink tapahtuvat samanaikaisesti. Tämä kuitenkin heikentää palvelutasoa verkoissa, sillä osa symboleista joudutaan jättämään käyttämättä ja toisaalta se rajoittaa symbolisuhteen tiettyyn arvoon.

Siirryttäessä LTE-verkkoon myös core-verkko täytyy korvata EPC:llä (engl. evolved packet core). Tämä on rakennettava WiMAX-coren rinnalle, sillä niiden on toimittava yhtä aikaa, mikä lisää siirtymäkauden kustannuksia jonkin verran. LTE:n coreen kuuluvat laitteet ja rajapinnat on nähtävissä kuvassa 5.2.

LTE-verkossa voidaan hyödyntää samoja siirtoyhteyksiä kuin WiMAX-verkossa-kin. Tukiasemayhteydet toteutetaan tyypillisesti Layer 2 -yhteyksinä. Tällöin tukiaseman päivityksen yhteydessä tarvittavat VLANit yksinkertaisesti ohjataan ASN-GW:n sijaan SAE-GW:lle. Ensi vaiheessa WiMAXille varattu siirtoyhteydenskapasiteetti riittää myös LTE:lle, mutta 20 MHz:n kanavanleveyden tarjoaman yhteysnopeuden kasvun täysimittaiseen hyödyntämiseen kapasiteettia pitää kasvattaa. Siirryttäessä LTE Advancediin tarvitaan vastaava siirtoyhteydenskapasiteetin kasvatus kuin WiMAX 2 -päivityksen yhteydessä kuvattiin.

LTE-päivityksen etuja on kuvattu edellä luvussa 5.1. Tärkeimpänä päätelaiteveitoisella markkinalla on se, että LTE on suurella todennäköisyydellä tuettuna valmiina juuri niissä päätelaitteissa, joita kuluttajat eniten haluavat hankkia. WiMAX-

verkossa tämä ei ole ollut mahdollista, vaan suuret operaattorit ovat hankkineet erikoistilauksena päätelaitteita joissa on tuki juuri heidän tarvitsemilleen verkoille (ks. [11] ja [35]).

Asiakaspohja LTE-verkossa on nähtävä suhteellisen taattuna, joten teknologian kehitys tulee varmasti jatkumaan myös tulevaisuudessa. Tässä mielessä LTE on operaattorille turvallinen pitkän aikavälin valinta. Tulevaisuudessa, vielä vahvistamattomissa ja kehityksen alla olevissa standardiversioissa on tulossa esimerkiksi kanavien aggregointi siten, että yksi päätelaite voi käyttää useampaa kanavaa yhtä aikaa. Tästä seuraavana kehityspolulla on kokonaan eri taajuusalueilla ja kanavoinnilla toteutettujen kanavien yhtäaikainen käyttö. Tarkalleen ottaen OFDMA-alikanavan muodostavat kantoaallot voisi vapaasti allokoida koko käytössä olevan taajuuskaistan alueelta. Tämä tekniikka ei kuitenkaan vielä ole toteutuskelpoinen, vaan se vaatii kehitystyötä muun muassa ohjelmistopohjaisen radion osalta. Tavoitteena tässä on saada operaattorin hallussa oleva taajuuskaista tehokkaammin käyttöön.

6. YHTEENVETO

Mobiili-WiMAX-tekniikka tarjoaa operaattorille kustannustehokkaan tavan tuottaa laajakaistapalvelua harvaankin asutuilla alueilla. Kalliita kiinteitä asennuksia ei tarvita, vaan yksi tukiasema voi palvella asiakkaita useamman kilometrin säteellä. Mobiili-WiMAX käyttää korkeita taajuuskaistoja (2,3, 2,5 ja 3,5 GHz) jotka vaimevat ilmassa suhteellisen pian, minkä vuoksi tällä tekniikalla ei kuitenkaan ole taloudellisesti kannattavaa tehdä koko maan kattavaa verkkoa. Se on silti erinomainen vaihtoehto paikallisten verkkojen toteutukseen, esimerkiksi yksittäisten taajamien kattamiseen.

Verkon käyttäjäkohtainen siirtonopeus on maksimissaan jopa 30 Mbps. Nopeus on riittävä paitsi Internet-selailuun, myös erilaisiin multimediasovelluksiin, kuten puheen ja videokuvan siirtämiseen. Käyttäjien on mahdollista liikkua vapaasti verkon peittoalueella.

Internet-selailun ja sosiaalisen median sovellusten ohella tärkeimmät ominaisuudet mobiilikäyttäjille ovat yhä perinteiset puhelut ja tekstiviestit. Näiden tarjoamista mobiili-WiMAX verkossa rajoittaa kolme seikkaa:

- peittoalueen rajallisuus,
- sopivien päätelaitteiden saatavuus, sekä
- palveluntuottamisen ongelmat.

Mobiili-WiMAX on puhtaasti IP-pohjainen datansiirtoverkko, mutta hyvien QoS-ominaisuuksien ansiosta puhe voidaan kuljettaa VoIP:n avulla. Peittoalueen paikallisuuden vuoksi mobiili-WiMAX ei kuitenkaan yksistään ole riittävä verkkoyhteys matkapuhelimeen, vaan sen lisäksi tarvitaan jokin toinen verkko, joka palvelee niillä alueilla joilla WiMAX-verkkoa ei ole saatavilla. Verkon vaihto tekniikasta toiseen ei ole saumatonta, mikä merkitsee sitä että päätelaitteen IP-osoite vaihtuu sen siirtyessä verkosta toiseen. Tämä aiheuttaa puhelun katkeamisen. Kaiken kaikkiaan riittävän palvelutason takaaminen mobiilille VoIP-käyttäjälle on hyvin hankalaa. Kiinteän puhelinlinjan korvaaminen mobiili-WiMAX-yhteydellä sen sijaan on vaivatonta.

Multimediasovellusten tuottamista IP-verkossa varten on kehitetty IMS-järjestelmä. Se perustuu kerrosarkkitehtuuriin, jossa IMS-kerros erottaa sovelluspalvelimet ja itse IP-verkot toisistaan. Tavoitteena on palvelutoteutuksien yksinkertaistaminen ja kehittämisen nopeuttaminen, kun sovelluspalvelimilla täytyy olla rajapin-

ta vain IMS-järjestelmään, joka huolehtii liikenteen sovittamisesta ja muun muassa QoS-määrittämisestä kaikille siihen liitetuille verkoille. IMS toimii minkä tahansa IP-verkon kanssa ja lisäksi siihen voidaan liittää yhdyskäytävän avulla muitakin verkkoja, kuten perinteinen puhelinverkko. Mikä tahansa multimediaspalvelu, joko jo olemassa oleva tai vasta kehitteillä oleva, on toteutettavissa IMS-järjestelmän avulla. Mikään palvelu ei kuitenkaan sinänsä vaadi IMS-järjestelmää toimiakseen, vaan ne ovat täysin toteutettavissa ilmankin sitä. IMS ei ainakaan tällä hetkellä tarjoa mobiili-WiMAX-operaattorille sellaista lisäarvoa, että järjestelmän hankkiminen olisi sille kannattavaa.

Kaiken kaikkiaan mobiili-WiMAX näyttäisi olevan erinomainen tapa tarjota laajakaistainen Internet-yhteys ja VoIP-puhelinyhteys asiakkaan kotiin. Rajoitetusti, esimerkiksi useiden toimipisteiden välillä liikkuvalla käyttäjälle verkon tarjoama mobiliteetti on hyvä lisäarvo, kun verkkoyhteyden saa samalla päätelaitteella kaikissa käyttöpaikoissa. Jos käyttäjä tarvitsee laajempaa liikkuvuutta erityisesti taajama-alueiden ulkopuolella, mobiili-WiMAX-verkko ei enää ole vahvimmillaan. Tämä, sekä sopivien päätelaitteiden puute, rajoittaa tekniikan soveltuvuutta matkapuhelin ja tablettitietokonekäyttöön.

Tulevaisuudessa LTE-teknologia eri kehityssasteineen kasvaa merkittävimmäksi langattomaksi verkkotekniikaksi. Mobiili-WiMAX-verkko on muunnettavissa LTE-verkoksi parhaimmillaan pelkän ohjelmistopäivityksen avulla. Päivityksestä saatavat edut ja sen mukanaan tuomat haitat on tietysti arvioitava tarkkaan. Näyttäisi kuitenkin todennäköiseltä, että useat mobiili-WiMAX-operaattorit tulevat siirtymään LTE-teknikkaan kun verkon päivitys tulee ajankohtaiseksi.

LÄHTEET

- [1] 3GPP. TS 23.228, IP Multimedia Subsystem (IMS); Stage 2. 3GPP, 2012.
- [2] 3GPP. TS 24.341, Support of SMS over IP networks; Stage 3. 3GPP, 2012.
- [3] 4 L/2009 M. Radiotaaajuusmääräys. Viestintävirasto, 2009.
- [4] Alvarion. Access Service Network Gateway Portfolio [verkkosivu, viitattu 28.11.2011]. Saatavissa: <http://www.alvarion.com/index.php/en/access-service-network-gateway>.
- [5] Berardinelli, Gilberto et al. OFDMA vs. SC-FDMA: Performance comparison in local area IMT-A scenarios. IEEE Wireless Communications, 2008. Vol 15: 5, s. 64–72.
- [6] Blake, S. et al. Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers. RFC 2474. IETF, 1998.
- [7] Clearwire. Company information about CLEAR [verkkosivu, viitattu 30.7.2010]. Saatavissa: <http://www.clear.com/support/about>.
- [8] Datame. @450-verkon uusi tekniikka otettu käyttöön 4.12.2012 [verkkosivu, viitattu 23.12.2012]. Saatavissa: <http://www.datame.fi/ajankohtaista.php?id=23>.
- [9] ETSI. TR 101 672. ETSI, 1999.
- [10] Hong, Daehyoung. 2.3GHz Portable Internet (WiBro) for Wireless Broadband Access. Busan, Korean Tasavalta, 10.9.2004. Esitys ITU-APT Regional Seminar on Broadband Wireless Access for Asia Pacific Region seminaarissa. Aineisto saatavissa: http://www.itu.int/ITU-D/imt-2000/Meetings/Busan/Session3_TTA.pdf.
- [11] HTC. HTC Evo 4G [verkkosivu, viitattu 10.10.2012]. Saatavissa: <http://www.htc.com/us/smartphones/htc-evo-4g-sprint>.
- [12] IEEE 802.16-2009. IEEE Standard for Local and Metropolitan area networks, Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. New York: IEEE, 2009.
- [13] ITU. Spectrum for IMT [verkkodokumentti]. Saatavissa: www.itu.int/ITU-D/tech/MobileCommunications/Spectrum-IMT.pdf.

- [14] ITU-R. Recommendation M.1034-1 Requirements for the radio interface(s) for International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000) [verkkodokumentti]. ITU-R, 1997. Saatavissa: http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1034-1-199702-I!!PDF-E.pdf.
- [15] ITU-R. Report M.2134 Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s) [verkkodokumentti]. ITU-R, 2008. Saatavissa: http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2134-2008-PDF-E.pdf.
- [16] The Kannel Group. Kannel: Open Source WAP and SMS gateway [verkkosivu, viitattu 19.2.2013]. Saatavissa: <http://kannel.org>.
- [17] Liikenne- ja viestintäministeriö. Laajakaista kaikkien ulottuville. Kansallinen toimintasuunnitelma tietoyhteiskunnan infrastruktuurin parantamiseksi (LVM46/2008). Liikenne- ja viestintäministeriö, 2008.
- [18] Nuaymi, Loutfi. WiMAX: Technology for Broadband Wireless Access. Chichester: John Wiley and Sons, 2007. 283 s. ISBN 978-0-470-028087.
- [19] OpenSIPS Project. OpenSIPS [verkkosivu, viitattu 19.1.2013]. Saatavissa: <http://opensips.org>.
- [20] Rosenberg, J. et al. SIP: Session Initiation Protocol. RFC 3621. IETF, 2002.
- [21] Telecommunications Technology Association. WiBro Overview [verkkosivu, viitattu 5.8.2010]. Saatavissa: <http://www.wibro.or.kr/new/overview03.jsp>.
- [22] WiMAX Antennas Primer - A guide to MIMO and beamforming [verkkosivu, viitattu 21.7.2010]. Saatavissa: <http://www.wimax.com/wimax/wimax-antennas-primer-a-guide-to-mimo-and-beamforming>.
- [23] WiMAX Forum. Industry Standards, Spectrum and Regulation [verkkosivu, viitattu 4.8.2010]. Saatavissa: <http://www.wimaxforum.org/resources/frequently-asked-questions/industry-standards-spectrum-and-regulation>.
- [24] WiMAX Forum. Migration from WiMAX Release 1 to Release 2 Part 2: Air Interface Migration with Network Reuse [verkkodokumentti]. WiMAX Forum, 2011. Saatavissa: http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/document_library/WMF-M14-003-v01_Network%20Migration%20Whitepaper.pdf.

- [25] WiMAX Forum. Mobile System Profile Specification, Release 1.5 Common Part [verkkodokumentti]. WiMAX Forum, 2009. Saatavissa: http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/technical_document/2009/07/WMF-T23-001-R015v01_MSP-Common-Part.pdf
- [26] WiMAX Forum. Network Architecture (Stage 2: Architecture Tenets, Reference Model and Reference Points), Part 1 [verkkodokumentti]. Release 1.0 Version 4. WiMAX Forum, 2009. Saatavissa: http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/technical_document/2009/07/WMF-T32-002-R010v04_Network-Stage2-Part1_2_0.pdf.
- [27] WiMAX Forum. Recommendations and Requirements for Networks based on WiMAX Forum Certified Products [verkkodokumentti]. WiMAX Forum, 2006. Saatavissa: http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/technical_document/2009/08/WMF-T31-001-R010v01%20Network%20Requirements%20Release_1.0.pdf.
- [28] WiMAX Forum. Requirements and Recommendations for WiMAX Forum Mobility Profiles [verkkodokumentti]. WiMAX Forum, 2005. Saatavissa: http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/technical_document/2009/08/WMF-T21-001-R010v01%20Rel%201.0%20Mobility%20Profile%20Requirements.pdf.
- [29] WiMAX Forum. Technical Specifications [verkkosivu, viitattu 11.4.2011]. Saatavissa: <http://www.wimaxforum.org/resources/documents/technical>.
- [30] WiMAX Forum. The WiMAX Forum FAQ [verkkosivu, viitattu 20.7.2010]. Saatavissa: <http://www.wimaxforum.org/resources/frequently-asked-questions/wimax-forum-faq>.
- [31] WiMAX Forum. WiMAX 2 Collaboration Initiative (WCI) Frequently Asked Questions [verkkodokumentti]. WiMAX Forum, 2010. Saatavissa: http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/page/2009/12/wimax_2_collaboration_initiative_qa_april_12_2010.pdf.
- [32] WiMAX Forum. WiMAX and the IEEE 802.16m Air Interface Standard [verkkodokumentti]. WiMAX Forum, 2010. Saatavissa: http://resources.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/document_library/wimax_802.16m.pdf.

- [33] WiMAX Forum. WiMAX Forum Industry Research Report, March 2011 [verkkodokumentti]. WiMAX Forum, 2011. Saatavissa: http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/page/2011/03/Monthly_Industry_Report_March2011.pdf.
- [34] WiMAX Forum. WiMAX Maps [verkkosivu, viitattu 3.8.2010]. Saatavissa: <http://www.wimaxmaps.org>
- [35] Yota. HTC MAX 4G Specifications [verkkosivu, viitattu 10.10.2012]. Saatavissa: http://yota.com.ni/en/htc_max_4g/spec.